

VERIFICAR LA FUNCIONALIDAD DEL MÉTODO SISTEMÁTICO PARA EL DISEÑO DE FILTROS PASIVOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA DE MAYOR DIMENSIÓN.

Ricardo Maya Arbeláez
Steven Galindo Noreña

VERIFICAR LA FUNCIONALIDAD DEL MÉTODO SISTEMÁTICO PARA EL DISEÑO DE FILTROS PASIVOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA DE MAYOR DIMENSIÓN.

Ricardo Maya Arbeláez
Steven Galindo Noreña

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de Ingeniero Electricista

Pereira, julio de 2018
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Programa de ingeniería Eléctrica



Verificar la funcionalidad del método sistemático para el diseño de filtros pasivos en sistemas eléctricos de potencia de mayor dimensión.

©Ricardo Maya Arbeláez

Steven Galindo Noreña

Director: Msc. Alfonso Álzate Gómez

Pereira, Julio 2018
Programa Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
La Julita, Pereira (Colombia)
TEL: (+57) (6)3137122
www.utp.edu.co

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por apoyarnos en todo este proceso, por luchar por nosotros para ser mejores personas.

RESUMEN

En la actualidad la distorsión armónica es un problema en crecimiento debido al aumento considerable de cargas no lineales, las cuales como principal efecto tienen el de distorsion la onda y dando como resultado mal funcionamiento de los equipos, falsas señales de disparo a las protecciones, resonancia entre elementos y hasta la destrucción de los mismos entre otros. Este fenómeno requiere total atención para evitar estos inconvenientes y darle una solución oportuna generaría un ahorro considerable, no solo de energía sino también en los elementos de generación, transmisión y distribución, aumentado su vida útil al darle un mejor funcionamiento.

El objetivo de este trabajo es demostrar que, con la implementación de filtros, en este caso pasivos, pueden brindar una solución satisfactoria dejando los níveles de distorsión armónica dentro de lo permitido por los estándares. Se plantean un método sistemático para el diseño de los filtros de acuerdo al problema existente y brindando así una facilidad de implementación en cualquier sistema igual o de menor tamaño al presente en este documento.

Índice general

1. Introducción

1.1- Antecedentes.....	9
1.2- Planteamiento del problema.....	10
1.3- Justificación.....	11
1.4- Objetivos.....	11
1.3.1- General.....	11
1.3.2- Específicos.....	11
1.5- Estado del arte.....	12

2- Análisis de armónicos.....13

2.1- Introducción.....	13
------------------------	----

2.2- Definición de los armónicos.....14

2.2.1- Armónicos de corriente.....	15
2.2.2- Armónicos de tensión.....	15

2.3- Modelado de los elementos.....16

2.3.1- Líneas de transmisión.....	16
2.3.2- Transformadores.....	16
2.3.3- Generadores síncronos.....	17
2.3.4- Banco de capacitores.....	18

2.4- Modelo de cargas lineales.....18

2.5- Modelo de cargas no lineales.....19

2.5.1- Fuente de corriente constante.....	19
2.5.2- Equivalente de Norton.....	20
2.5.3- Matriz de admitancias de frecuencia cruzada.....	21

2.6- Métodos empleados para el análisis de armónicos.....22

2.6.1- Barrido en frecuencia.....	23
2.6.2- Inyección de corrientes.....	24

2.6.3- Flujo de potencia armónico.....	25
3- Diseño de filtros para la eliminación de armónicos.....	26
3.1- Introducción.....	26
3.2- Filtros pasivos.....	26
3.2.1- Tipos de filtros.....	27
3.2.1.1- Filtros serie	27
3.2.1.1- Filtros “Shunt” o paralelo	27
3.2.2- Criterio para diseño de filtros pasivos.....	29
3.2.3- Ecuaciones para el diseño.....	29
3.2.4- Resonancia paralela y serie.....	30
3.2.5- Factor de calidad (Q).....	32
3.2.6- Valores de funcionamiento recomendadas para los componentes del filtro.....	33
3.2.6.1- Condensadores.....	33
3.2.6.2- Inductores de sintonización.....	33
4- Método sistemático para el diseño de filtros pasivos.....	35
4.1- Introducción.....	35
4.2- Metodología.....	35
4.2.1- Flujo de potencia convencional.....	35
4.2.2- Inyección de corrientes.....	36
4.2.3- Barrido en frecuencia.....	36
4.2.4- Diseño de filtros sintonizados simples.....	36
4.2.5- Diagrama de flujo.....	37
5- Casos de estudio.....	38
5.1- Sistema de prueba de nueve nodos IEEE.....	38
5.2- Sistema de prueba de ocho nodos IEEE.....	40
6- Resultados.....	42
6.1- Resultados simulaciones para sistema de prueba IEEE nueve nodos.....	42
6.1.1- Flujo de potencia armónico.....	42
6.1.2- Barrido en frecuencia.....	50
6.2- Resultados simulaciones para sistema de nueve nodos IEEE con filtro.....	55
6.2.1- Flujo de potencia armónico.....	55
6.2.2- Barrido en frecuencia con la implementación del filtro.....	63
6.2.3- Parámetros para el diseño del filtro.....	68

6.3-	Resultados simulaciones para sistema de prueba IEEE ocho nodos.....	68
6.3.1-	Flujo de potencia armónico.....	68
6.3.2-	Barrido en frecuencia.....	75
6.4-	Resultados simulaciones para sistema de ocho nodos IEEE con filtro.....	79
6.4.1-	Flujo de potencia armónico.....	79
6.4.2-	Barrido en frecuencia con la implementación del filtro.....	86
6.4.3-	Parámetros para el diseño del filtro.....	91
7-	Conclusiones.....	92
8-	Bibliografía.....	93

1.1- Antecedentes

La aparición de los armónicos no es un problema reciente, esta data a partir de principio de siglo XIX, aproximadamente entre 1910 y 1960, donde las principales fuentes generadoras de armónico eran las máquinas rotatorias y transformadores. En esta época, a pesar de que este problema no era tan grave, si tenía ciertas repercusiones en las mismas, calentado el embobinado y saturándolos respectivamente. A dicho problema se le dio una solución, la cual correspondía a la manera de conectar los bobinados del transformador para así eliminar las corrientes armónicas. También se redujo dicho problema aterrizando bien lo elementos, pero con el aumento de estos y con la aparición de la electrónica de potencia, dicho problema empezaría a tener consecuencias más graves, las cuales no se solucionaban con los métodos mencionados anteriormente. Esta distorsión generada por la suma de todos los elementos conectados a la red (transformadores, maquinas rotativas, rectificadores de potencia y elementos electrónicos en general) empezó a generar problemas en los conductores que transportaban la electricidad, como calentamiento debido a estas corrientes armónicas y por ende deteriorándose, reduciendo su vida útil y en ocasiones generando su destrucción.

Para la solución de estos problemas generados por los armónicos, se ha planteado a través de los años la implementación de filtros (activos, pasivos e híbridos) para controlar dichos problemas, con el fin de reducirlos y mantenerlos en estándares permitidos dando como resultado una mejor calidad de energía y aumentando la vida útil de los elementos que la emplean.

1.2- Planteamiento del problema

El incremento de cargas no lineales conectadas a la red eléctrica en la actualidad ha provocado problemas de distorsión armónica en la red, lo que conlleva a inconvenientes en los principales elementos como lo son transformadores, líneas de transmisión, protecciones, del sistema eléctrico de potencia; por ello se hace importante solucionar el problema de la distorsión armónica, pues esta puede provocar consecuencias graves como recalentamiento de los equipos, accionamiento de las protecciones por falsos valores, sobrecargas en las líneas y en todos los dispositivos conectados al sistema.

Para solucionar estos problemas de distorsión se han implementado varias soluciones; una de ellas consiste en el uso de filtros, que eliminan este tipo de contaminación de la red dejando solamente la frecuencia fundamental del sistema.

De acuerdo a lo anterior surge la necesidad de verificar el funcionamiento de un método para el diseño de filtros pasivos en sistemas eléctricos de potencia [5], en un sistema de mayor dimensión al ya propuesto en dicho método.

1.3- Justificación

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) están diseñados para operar a una frecuencia (60Hz), sin embargo, al conectar al SEP ciertos tipos de cargas de comportamiento no lineal, se produce un tipo de contaminación en la red, esta contaminación se denomina “armónico” y se hace notoria en las ondas de corriente y tensión del sistema.

En general cualquier carga no lineal es una fuente de armónicos para el sistema, ya que este tipo de cargas no tienen una impedancia constante y este comportamiento se puede encontrar en muchos dispositivos conectados a la red como lo son los transformadores, reguladores entre otros. En la actualidad la fuente de armónicos más común es la de las cargas que utilizan electrónica de potencia, dispositivos como fuentes conmutadas, variadores de velocidad y convertidores generan una gran cantidad de armónicos pues estos usan elementos no lineales como diodos, tiristores y transistores de potencia.

El principal efecto de los armónicos es la aparición de tensiones no sinusoidales en varios puntos del sistema que son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas en las líneas, la aparición de dichas corrientes produce caídas de tensión en la red; mientras mayores sean las corrientes distorsionadas en la red mayor será la distorsión de las tensiones en el circuito. El efecto de las tensiones no sinusoidales se puede manifestar en el calentamiento de cables y equipos, saturación de los transformadores, pérdida de rendimiento en motores y en general el aumento de pérdidas en el sistema. Por lo ya mencionado se hace importante contar con métodos para la reducción o eliminación de este tipo de perturbaciones en el sistema, el cual es implementado un filtro cuyo objetivo es reducir considerablemente la aparición de estas corrientes.

1.4- Objetivos

1.4.1- Objetivo general

- Verificar la funcionalidad del método sistemático para el diseño de filtros pasivos en sistemas eléctricos de potencia de mayor dimensión.

1.4.2- Objetivos específicos

- Revisar algunos métodos sistemáticos para el diseño de filtros pasivos.
- Comprobar algunos casos de estudio para verificar el funcionamiento del método en sistemas eléctricos de mayor dimensión.
- Realizar simulaciones de los casos de estudio y reportar los resultados de la implementación del método.
-

1.5- Estado del arte

En [1] se plantea una posible solución al problema de los armónicos en la red mediante la implementación de un filtro tipo kalman, el cual procesa la señal de los armónicos y toma una decisión. El autor concluye que la implementación de este filtro en conjunto con un procesador digital de señales tiene una respuesta satisfactoria.

En [2] se plantea solucionar de manera jerarquizada este problema, el cual aparece cuando se implementan cargas no lineales al sistema empezando por baja tensión (usuario), empleando el transformador como una barrera y segundo resolviéndolo de forma global y buscando mantener los armónicos en sus niveles permitidos, para esto se emplean condensadores, filtros activos y pasivos.

En [3] se plantea que el problema sobre los estándares que permiten ciertos niveles de armónicos en la red, además describe los problemas que estos presentan sobre los sistemas eléctricos y equipos como lo son el calentamiento y posible destrucción de los mismos (transformadores, equipos electrónicos, conductores, motores y generadores, etc.)

En [4] se plantea el estudio detallado y el modelamiento de las cargas no lineales, el cual se desarrolla mediante la implementación de equipos capaces de medir armónicos en la red y detectar sus principales fuentes de generación de armónicos, también se simula un sistema mediano de distribución con fuentes grandes de armónicos.

2- Análisis de armónicos

2.1- Introducción

Los sistemas eléctricos en la actualidad están diseñados para funcionar a unos niveles de tensión establecidos (llamados fundamentales) y a un valor de frecuencia, estos describen la forma de una onda sinusoidal. Sin embargo, el principal problema que se presenta es la distorsión de esta onda, dando como resultado una onda no pura, esto se debe a la conexión al sistema eléctrico de elementos no lineales, los cuales actúan como fuentes inyectoras de armónicos, generando así distorsión en la onda.

Para poder definir realmente los armónicos, primero se debe entender cuál es la onda que se desea mantener, la cual esta descrita por la siguiente función

$$V(t) = V_p \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.1.1)$$

$$i(t) = i_p \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.1.2)$$

Donde:

V_p es el valor pico de tensión

I_p es el valor pico de corriente

ωt es el valor de la frecuencia fundamental

φ es el valor de desfase de la onda

Esta función describe la forma de onda que contiene la tensión y la corriente, la cual tiene unos valores fundamentales. Cuando dicha función no tiene una forma sinusoidal es cuando se considera que dicha onda presenta armónicos, lo cual por lo general altera los valores pico de tensión y corriente y por ende genera un mal funcionamiento de los equipos conectados a esta red.

La distorsión de la onda debida a fuentes no lineales, además de ser un inconveniente para el adecuado funcionamiento de los equipos, presenta problemas de mayor magnitud, como lo puede ser la resonancia, dado el caso que dos elementos entren en resonancia se puede generar la destrucción de los mismos, además de generar calentamiento en los conductores, saturar los transformadores y enviar señales falsas de disparo a las protecciones. En la figura (2) se puede ver claramente el efecto de los armónicos en la onda.

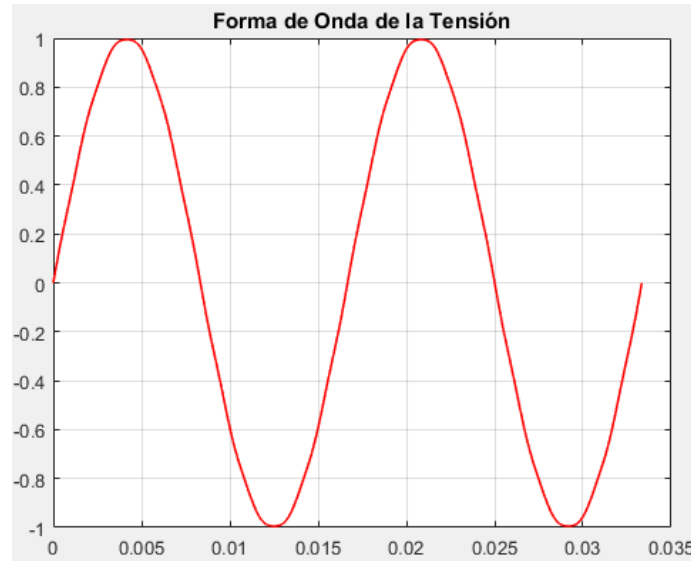


Figura 1. Forma de onda con valores fundamentales.

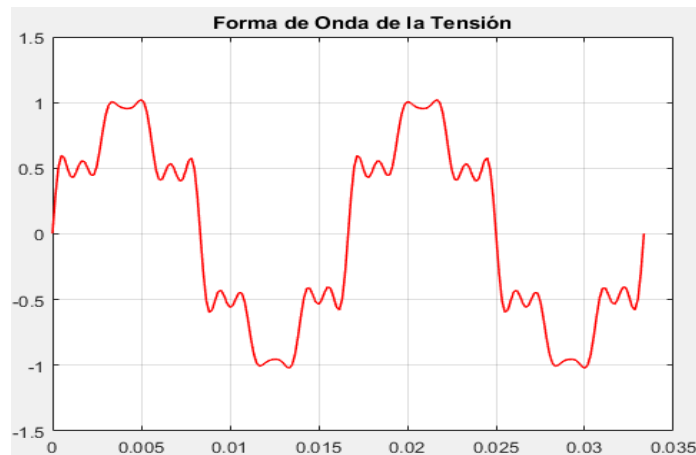


Figura 2. Forma de onda debido a los armónicos.

2.2- Definición de los armónicos

Los armónicos son corrientes y tensiones que son múltiplos de la frecuencia fundamental que posee la fuente de generación, la cual normalmente está entre 50 y 60 Hz. La principal causa de estos son las cargas no lineales, las cuales son principalmente componentes electrónicos, banco de capacitores y elementos derivados de la electrónica de potencia, estos generan distorsión en la onda dando como resultado una menor calidad de energía y presentando problemas para las empresas encargadas de la generación y distribución de esta.

Los armónicos en el sistema eléctrico de potencia fueron estudiados principalmente en Alemania entre las décadas de 1920 y 1930 donde se observó una distorsión en la onda proveniente de convertidores estáticos de potencia.

Estos armónicos se pueden representar mediante las series de Fourier para describir su aparición y dar como resultado un valor final de la onda. Se emplean diversos métodos para el análisis de estos y obtener así un cálculo aproximado, la siguiente ecuación describe una función conocida como la serie de Fourier la cual puede ser aplicada a los valores de tensión y corriente debido a que describen la misma función [4].

$$X(t) = a_o + \sum_{h=1}^{\infty} [a_n \cos\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) + b_n \sen\left(\frac{2\pi ht}{T}\right)] \quad (2.2.1)$$

2.2.1- Armónicos de corriente

Los armónicos creados por las cargas no lineales son los encargados de absorber la corriente de forma brusca, en impulsos, en lugar de hacerlo de manera suave describiendo la onda seno. Estos impulsos son los encargados de distorsionar la onda generando corrientes armónicas, son múltiplos de la frecuencia, las cuales retornan no solo a la fuente de alimentación sino también a otros sectores del sistema eléctricos, ocasionando inconvenientes en el sistema eléctrico, calentando los conductores, saturando los transformadores, disparando las protecciones entre otros. La ecuación (2.2.2) describe la serie de Fourier de la corriente.

$$i(t) = \sum_{h=1}^h I_h \sen(n\omega_o t + \phi_h) \quad (2.2.2)$$

2.2.2- Armónicos de tensión

La relación de la corriente que absorbe la carga no lineal (corrientes armónicas) y la impedancia de la fuente del transformador de alimentación se rige por la ley de ohm y por este motivo aparecen valores de tensión armónicas.

Las redes de la alimentación en algunos casos son las que ocasionan los armónicos de tensión, todos los elementos conectados a un mismo transformador que genere armónicos se vería afectado por estos valores. En un ambiente de oficina los armónicos pueden generar mal funcionamiento de los equipos conectados al mismo, debido a que las corrientes armónicas generan caídas en la tensión hasta llegar al punto de causar un reset en estos debido a una reducción en el valor pico de la tensión. En los entornos industriales los que más se ven afectados son los motores de inducción y los bancos de capacitores empleados para la corrección del factor de potencia, debido a que los armónicos hacen que los capacitores entren en resonancia con las componentes inductivas del sistema ocasionando el daño de las protecciones y sobrecargando los capacitores. La ecuación (2.2.3) representa la serie de Fourier que describe el valor de la tensión.

$$V(t) = \sum_{h=1}^h V_n \sen(n\omega_o t + \theta_h) \quad (2.2.3)$$

2.3- Modelado de los elementos

El sistema eléctrico de potencia posee una serie de elementos encargados de la generación, transmisión y distribución de la electricidad, estos están representados por unos modelos matemáticos para obtener información sobre su funcionamiento y cómo se comportan. Cada uno de estos posee varias formas de ser representados, pero en este caso solo se explicará una, la cual se empleará más adelante para el desarrollo de los algoritmos.

2.3.1- Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión son los elementos encargados de transportar la energía eléctrica desde las fuentes de generación hasta las subestaciones, estas se caracterizan por tener una resistencia en serie con una inductancia debido a la corriente que circula por ellas y también generan un efecto capacitivo con el suelo. El modelo más empleado para el estudio de estas es el modelo PI, el cual describe matemáticamente como están distribuidos sus parámetros.

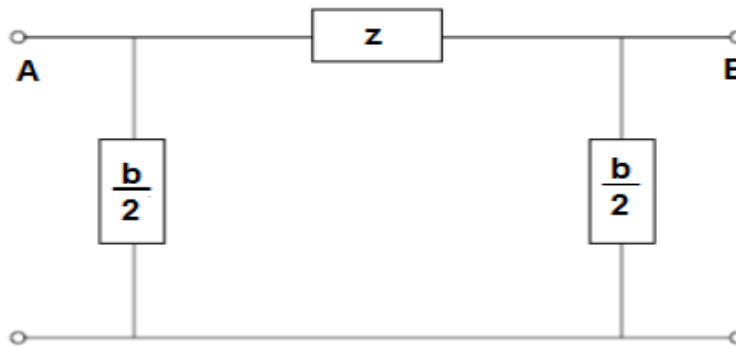


Figura 3. Modelo PI línea de transmisión

Para estas se emplea el siguiente modelo matemático para la obtención de los cálculos empleados en el algoritmo

$$Z = R_L + jhX_L \quad (2.3.1)$$

$$\frac{b}{2} = jhb_{ab} \quad (2.3.2)$$

2.3.2- Transformadores

Los transformadores juegan un papel muy importante en la transmisión y distribución de la energía eléctrica, ya que estos permiten elevar y reducir los niveles de tensión para su transmisión y distribución, en el modelo matemático que se empleará no se incluirá el efecto capacitivo, ya que este solo aparece cuando las frecuencias son altas (mayores a 10KHz) y para el sistema eléctrico la máxima es de 2KHz.

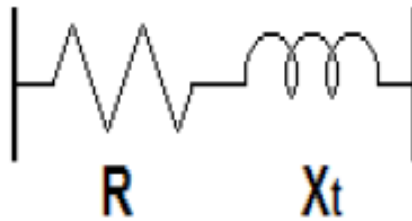


Figura 4. Modelo del transformador

Para este se emplea el siguiente modelo matemático para la obtención de los cálculos empleados en el algoritmo.

$$Z_T = R\sqrt{h} + jhX_L \quad (2.3.3)$$

2.3.3- Generadores síncronos

Estos son los encargados de la generación de la energía, convierten por medio de la rotación de las turbinas, energía ya sea proveniente del agua (hidráulica) o por medio del paso de vapor de agua (térmica). Los generadores síncronos son considerados como elementos no generadores de armónicos, debido a que las corrientes armónicas a pesar de que producen fuerzas rotatorias, no generan reacción de armadura y por ende no los produce. Este se puede representar por medio de un circuito equivalente como aparece en la siguiente figura:

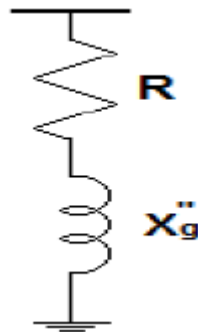


Figura 5. Modelo equivalente del generador síncrono

Para este se emplea el siguiente modelo matemático para la obtención de los cálculos empleados en el algoritmo

$$Z_g = R\sqrt{h} + jhX''_g \quad (2.3.4)$$

En donde R determina las pérdidas de potencia y X''_g es la reactancia subtransitoria del eje directo del generador

2.3.4- Banco de capacitores

Estos son empleados en el sistema de potencia con una única función que es corregir el factor de potencia y reducir así la aparición de potencia reactiva, la cual genera problemas de pérdidas. Sin embargo, a pesar de ser una buena solución al problema de corrección de factor de potencia, esto se convierte en una fuente de armónicos, generando así problemas, por ende, requieren un estudio para su corrección.

Estos pueden estar conectados en delta o en estrella, dependiendo de que se requiera.

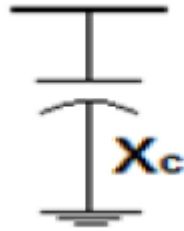


Figura 6. Modelo equivalente del banco de capacitores por fase

Para este se emplea el siguiente modelo matemático para la obtención de los cálculos empleados en el algoritmo

$$X_c = \frac{V_{LL}^2}{hQ_{3\phi}} \quad (2.3.5)$$

donde V_{LL} y $Q_{3\phi}$ son valores nominales de tensión y potencia reactivas del banco de capacitores respectivamente.

2.4- Modelo de cargas lineales

Las cargas lineales se consideran como elementos no generadores de armónicos, estas son las encargadas del consumo de la energía eléctrica generada, son la parte final del sistema eléctrico. No se tiene un modelo exacto de estas cargas, debido a que para poder modelar la carga se debe tener gran información sobre que va a ir conectado al sistema y por lo general no se tiene dicha información, por lo tanto, lo que se emplea son modelos aproximados de estas. En la siguiente figura se observa el modelo empleado para la obtención de la información necesaria para el desarrollo del programa.

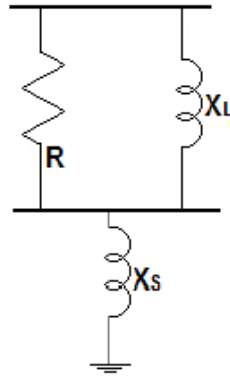


Figura 7. Modelo aproximado de una carga lineal

Para este se emplea el siguiente modelo matemático para la obtención de los cálculos empleados en el algoritmo.

$$R = \frac{V_{LL}^2}{P_{3\phi}} \quad (2.4.1)$$

$$X_L = \frac{jhR}{\frac{6,7Q_{3\phi}}{P_{3\phi}} - 0,74} \quad (2.4.2)$$

$$X_S = jh(0,073R) \quad (2.4.3)$$

Donde X_L y R están en paralelo y a su vez en serie con X_S que es la inductancia del transformador.

2.5- Modelo de cargas no lineales

Las cargas no lineales, hoy en día están presentes en todo sistema eléctrico de potencia, y son las encargadas de inyectar la mayor cantidad de armónicos al sistema; en este documento se mostrará la manera de simular estas cargas de tal manera que pueda predecir su comportamiento y su impacto sobre el sistema eléctrico y sus componentes [3].

2.5.1- Fuente de corriente constante

Estas se emplean para representar fuentes de armónicos donde las cargas son muy sensibles a las variaciones de corriente, estas se modelan por medio de inyección de corrientes empleando una fuente constante. Este método es muy aproximado ya que los resultados obtenidos al emplearlo son muy cercanos a los reales y por ende en este documento será implementado. No obstante, no es muy preciso para casos atípicos, por lo tanto, no se recomienda emplearlo en dichas condiciones.

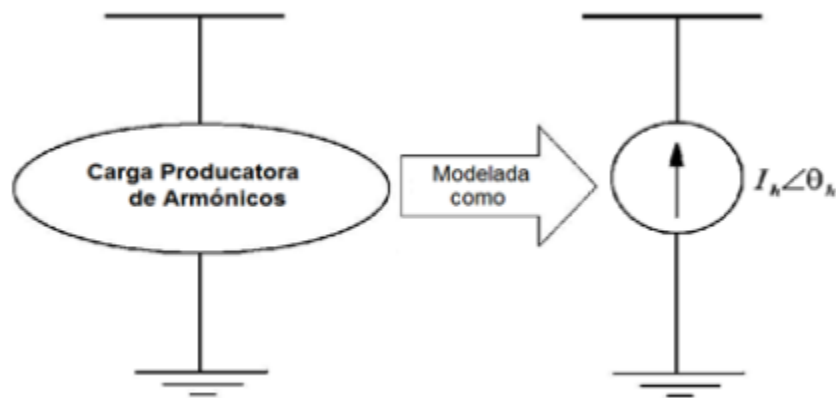


Figura 8. Representación de una fuente de armónicos.

2.5.2- Equivalente de Norton

Una de las maneras más precisas para modelar las cargas no lineales es por medio del equivalente de Norton, el cual se observa en la figura (9). Donde se requieren valores de I_h y V_h en dos diferentes condiciones de operación del sistema.

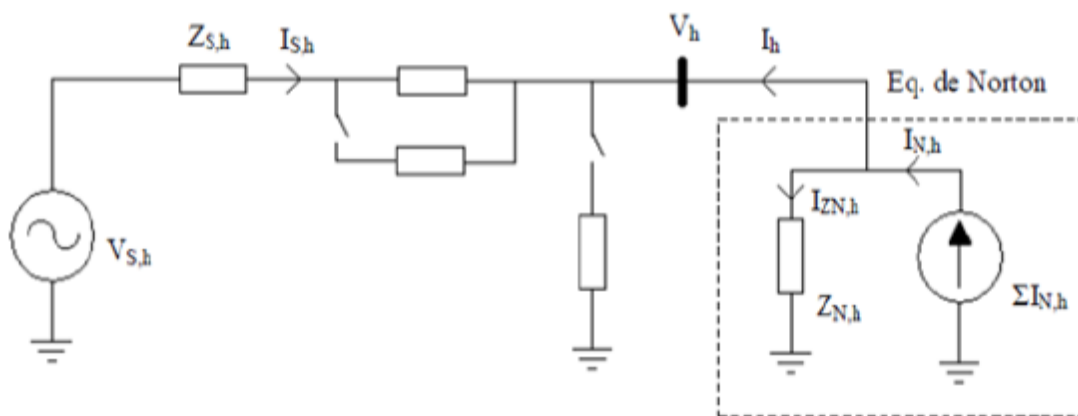


Figura 9. Equivalente de Norton.

Donde:

$V_{s,h}$ es la tensión armónica del sistema.

$Z_{s,h}$ es la impedancia armónica del sistema.

$I_{s,h}$ es la corriente armónica del sistema.

V_h es la tensión armónica en el lado de la carga.

I_h es la corriente armónica inyectada al sistema.

$I_{N,h}$ es la corriente armónica generada por la carga.

$I_{ZN,h}$ es la corriente armónica que circula por la impedancia de Norton.

$Z_{N,h}$ la impedancia armónica de Norton.

En el modelo equivalente de Norton la carga generadora de armónicos se puede modelar como un paralelo de la impedancia de Norton y una fuente de corriente de Norton para cada uno de los armónicos que aparecen (h). Los modelos se pueden expresar de la siguiente manera

$$Z_{N,h} \angle \delta_h = \frac{V_{h1} \angle \alpha_{h1} - V_{h2} \angle \alpha_{h2}}{I_{h2} \angle \theta_{h2} - I_{h1} \angle \theta_{h1}} \quad (2.5.1)$$

$$I_{N,h} \angle \phi_h = I_{h1} \angle \theta_{h1} + \frac{V_{h1} \angle \alpha_{h1}}{Z_{N,h} \angle \delta_h} = I_{h2} \angle \theta_{h2} + \frac{V_{h2} \angle \alpha_{h2}}{Z_{N,h} \angle \delta_h} \quad (2.5.2)$$

En las ecuaciones (2.5.1) y (2.5.2) los valores de tensión y de corrientes son valores con contenido armónico para dos casos diferentes, en el cual un equipo está conectado y el otro no. Por otra parte, es fundamental para la medida de la impedancia y corriente de Norton, hacer referencia al ángulo de fase de un voltaje en un nodo común, que no cambie con el estado del sistema. Para el sistema representado en la figura (9) el ángulo de fase de V_s es el punto de referencia para los ángulos tanto de la tensión como de la corriente [7].

2.5.3- Matriz de admitancias de frecuencia cruzada

Este método se emplea para verificar los componentes lineales del sistema. Se dice que el sistema es lineal cuando se le puede aplicar el principio de superposición, es decir que el n-esimo componte de la corriente armónica se puede calcular a partir del n-esimo componente de la tensión armónica suministrada [14].

En el caso de las cargas no lineales, estas son capaces de absorber de la fuente de alimentación corrientes armónicas, las cuales son múltiplos de la frecuencia, dando como resultados valores de tensión diferentes a los de la entrada y por ende el valor de la onda será distinto. En pocas palabras, al alimentar una carga no lineal con una fuente de tensión sinusoidal, dicha carga no solo absorberá la corriente fundamental que entrega la fuente sino también valores múltiplos de la frecuencia, generando así aumentos en las corrientes y caídas en la tensión de los elementos de alimentación. En este modelo se tiene en cuenta la relación entre los diferentes valores de tensión y corriente de los armónicos presentes, en la figura (10) se observa una matriz de admitancias la cual modela el valor de la carga armónica con diferentes valores de tensión y corriente.

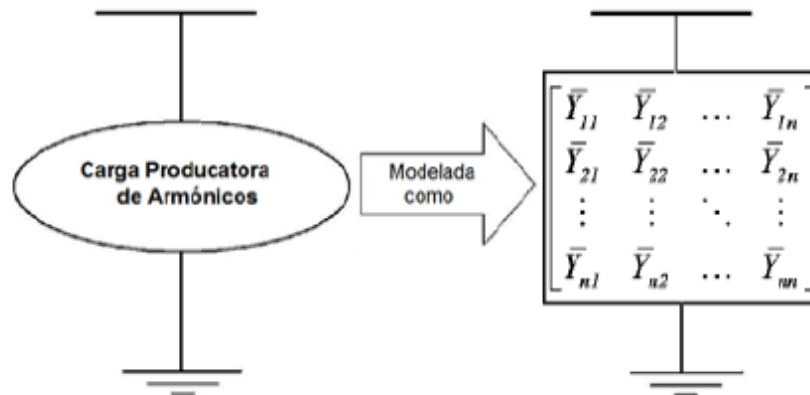


Figura 10. Matriz de admitancias de frecuencia cruzada.

Para este se emplea el siguiente modelo matemático para la obtención de los cálculos empleados en el algoritmo.

$$I_h = f[V_1, V_2, \dots, V_h] \quad (2.5.3)$$

En donde V_1, V_2, \dots, V_h son los fasores de las tensiones armónicas presentes en la fuente de alimentación, f es una matriz de admitancias armónicas e I_h son los fasores de la corriente armónica.

2.6- Métodos empleados para el análisis de armónicos

En el documento se han descrito anteriormente los modelos matemáticos que brindan la información necesaria para poder obtener el valor de los armónicos que se pueden presentar en un sistema eléctrico de potencia, esos modelos son los empleados en el programa para obtener los resultados, en esta sección se explicará detalladamente cuáles son los métodos que se emplean para poder definir el valor de los armónicos que puede llegar a presentar un sistema a partir de estos modelos.

El objetivo al momento de estudiar los armónicos es poder cuantificar el valor de distorsión de la onda tanto de tensión como de corriente y verificar que no existan condiciones peligrosas para el sistema (resonancia) y establecer que los valores de armónico estén dentro del estándar permitido (estándar IEEE 519-1992) [13]. Para esto se tienen los siguientes pasos:

- 1- Definir la fuente generadora de armónicos.
- 2- Determinar el modelo a utilizar para representar el sistema.
- 3- Simular los posibles escenarios.

Para realizar estos análisis se hace necesario el empleo de cálculos computacionales debido a la gran magnitud de los mismos, en este caso existen tres métodos empleados para la obtención de los valores de los armónicos, los cuales son:

- 1- Barrido en frecuencia.
- 2- Inyección de corrientes.
- 3- Flujo de carga convencional.

En general, el análisis de armónicos brinda como solución realizar para cada armónico de la red la solución de una ecuación.

$$[I_h] = [Y_h][V_h] \quad (2.6.1)$$

$$\text{con } h = 1, 2, 3, \dots, h$$

En la cual $[I_h]$ es el vector de inyección de corrientes armónicas, $[Y_h]$ es la matriz de admitancias del sistema y $[V_h]$ es el vector de tensiones nodales en el punto de interés.

2.6.1- Barrido en frecuencia

El barrido en frecuencia es el método más sencillo y el más empleado al momento de calcular los armónicos, debido a su poco requerimiento de datos lo hace un método de bajo consumo de recursos computacionales. En esencia, este método calcula la respuesta de frecuencia de la red vista desde un nodo en particular.

Normalmente se inyecta el valor de corriente en 1PU de una frecuencia en interés y se calcula la tensión en dicho nodo, este cálculo se repite para cada uno de los nodos de interés aumentando paso a paso el valor de la frecuencia, el proceso se basa principalmente en resolver la ecuación (2.6.2):

$$V_h = Z_h I_h \quad (2.6.2)$$

Donde V_h , Z_h e I_h son los vectores de tensión, impedancia y corrientes a la frecuencia estudiada.

En los estudios típicos solo aparece un vector de corrientes y el resto son cero, en otros estudios aparecen las componentes de corriente de secuencia positiva, negativa y cero. A partir de este método es posible desarrollar un plan de filtrado para evitar así la aparición de estos armónicos y controlar la distorsión de la onda de la tensión. Al graficar estas condiciones es posible visualizar claramente las condiciones de resonancia cuando aparecen, ya sea en serie o en paralelo, esto se puede observar en la figura (11) [5].

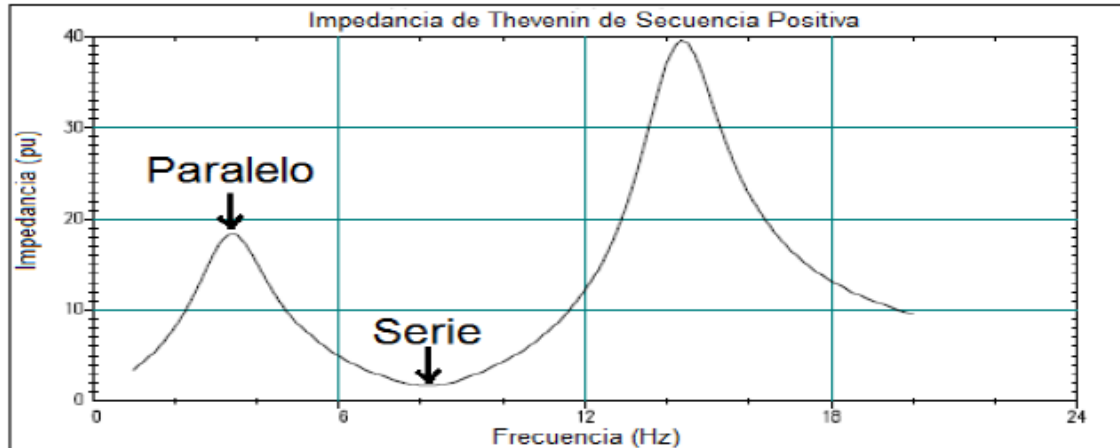


Figura 11. Representación de resonancias en serie y paralelo

2.6.2- Inyección de corrientes

Este método es el más empleado al momento de calcular armónicos en un sistema, debido a su simplicidad y gran exactitud. Este emplea el modelo de admitancias descrito anteriormente, el procedimiento consiste en un barrido similar al de la frecuencia pero esta vez para la inyección de corrientes, en donde las cargas no lineales se representan como una fuente de corriente con magnitud y ángulo, siendo más específicos estas cargas no lineales se representan como la suma de corrientes en cada armónico presente en el sistema descrito por la serie de Fourier; a menudo estas son representadas de manera vectorial para su análisis, dicho análisis se centra en los siguientes pasos [14]:

- 1- Formular la matriz de admitancias del sistema incluyendo todas las contribuciones de las fuentes y cargas lineales.
- 2- Construir el vector de inyección de corrientes, para cada armónico de interés, producto de las cargas no lineales.
- 3- Soluciona la ecuación (2.6.1) para determinar la tensión en todos los nodos de la red.

Para los pasos 1 y 3 se comienza con una frecuencia baja, la cual se observa en los vectores de corriente armónica y se repite esta misma para cada modelo de carga no lineal presente en el sistema. Es evidente que no todas las cargas inyectan los mismos armónicos, mientras unas van en 3° , 5° , 7° , 9° , etc. Otros van en valores como 5° , 7° , 11° , 13° , etc. Para sistemas monofásicos y trifásicos respectivamente. Dado el caso que esto ocurra, que una carga no lineal inyecte valores diferentes de corrientes armónicas, se tratará de establecer los valores de corrientes armónicas como cero en el nodo donde se presenten estos valores diferentes y continuar con la solución de la ecuación (2.6.1).

Una vez se emplea este método se logra obtener un sistema lineal (debido a que cada no linealidad se representó por medio de una inyección de corrientes) se puede aplicar el principio de superposición, en pocas palabras cada valor de corriente inyectada representa un coeficiente de Fourier de la magnitud de la tensión. La limitación que presenta este método es su poca eficiencia o validez cuando el THD (total harmonic distortion) excede el 10% [6].

2.6.3 Flujo de potencia armónico

Los problemas que se presentan al momento de emplear el método de inyección de corrientes se pueden corregir fácilmente empleando este método, sus siglas en inglés HPF (harmonic power flow). Esta combina el flujo de carga convencional con la inyección de corrientes, mejorando así los resultados obtenidos, los cuales poseen un mayor grado de exactitud. Existen dos variaciones para este método las cuales se mostrarán a continuación:

- 1- Se corre el flujo de carga convencional para calcular los valores, los cuales se encuentra el sistema bajo las condiciones dadas. Se calculan tensiones y corrientes en los nodos. Este sería el punto de partida, con estos valores se ajustan los vectores de inyección de corrientes.
- 2- Todas (o algunas) de las corrientes de las cargas no lineales se representan como se muestra en la ecuación (2.6.1.2) donde los valores de C_1, \dots, C_M se representan con M variables de control para modelar diferentes parámetros que pueda poseer la carga (velocidad del eje del motor entre otros) y V_1, \dots, V_N representa los valores de la tensión en los terminales de la carga.

$$\begin{matrix} I_1 & f_1(V_1, \dots, V_N, C_1, \dots, C_M) \\ \vdots & \vdots \\ I_N & f_N(V_1, \dots, V_N, C_1, \dots, C_M) \end{matrix} \quad (2.6.3)$$

Esta ecuación combinada con la (2.6.1) representan todo el modelo de cargas no lineales con su inyección de armónicos. Una vez se plantean las ecuaciones se resuelve el flujo de carga armónico por cualquier método ya sea newton o gauss. Las cargas lineales se pueden representar de una manera más sencillas, ya que se pueden modelar como un sistema de potencia constante (P+jQ).

3- Diseño de filtros para la eliminación de armónicos.

3.1- Introducción

Hoy en día con el evidente crecimiento de las cargas no lineales en los sistemas, se han incrementado los problemas producidos por los armónicos y debido a que se encuentran equipos conectados a esta misma red que pueden ser susceptibles a la distorsión de la onda tanto de corriente como de tensión producto de dichos armónicos, dando como resultado un mal funcionamiento de los mismos o en un caso más grave su posible destrucción. Es evidente la necesidad de una solución que evite que estos problemas se propaguen por la red. En este documento se presentarán los tipos de filtros pasivos y los criterios de diseño.

El problema de armónico tiene un estándar internacional por parte de la IEEE el cual es el estándar IEEE 519-1992 [13], que ha impuesto unos límites para los niveles de armónicos de corrientes y tensión. Para lograr cumplir estos niveles se implementan los filtros, en este caso pasivos, para lograr mitigar el impacto y reducir estos problemas, para lograr esto se conectan los filtros en derivación con las cargas lineales o no lineales a un nodo común o PCC (punto de acoplamiento común) en el sistema eléctrico. La función de estos filtros es comportarse como un camino de baja impedancia o un camino fácil para la corriente, estos se diseñan para los diferentes valores de frecuencia que aparecen a partir de estas cargas no lineales y con esto logran desviar o absorber dicha corriente armónica, evitando así que lleguen al sistema eléctrico [10].

3.2- Filtros pasivos

Los filtros pasivos son lo más empleados en la industria, debido a su bajo costo y su gran utilidad al momento del filtrado de armónicos, al estar compuestos por elementos RLC (resistencias, inductancias y capacitancias) estos son capaces de mejorar el factor de potencia, funcionando también como un banco de capacitores, reduciendo así el costo de este, de tal manera que es innecesario la implementación de ambos al tiempo. La mayoría de estos son diseñados a partir de las características que posee el sistema como distorsión armónica, corrientes armónicas, cargas no lineales y así también con las fuentes de generación cercanas y las cargas. Para diseñar filtros siempre se debe tener en cuenta los problemas presentados anteriormente, dado el caso de omitir alguno puede dar como resultado un bajo desempeño del mismo o un sobredimensionamiento, dando como resultado poca efectividad o altos costos, en algunos casos se puede llegar a incrementar los problemas.

Para la implementación eficiente de los filtros pasivos, estos deben ser ubicados cerca de las cargas productoras de armónicos, para así lograr una mejor filtración y una mejor reducción en la distorsión de onda. El tipo de filtro debe ser diseñado de acuerdo al armónico que se desee eliminar, en otras palabras, para cada armónico que se desee eliminar se debe diseñar un filtro con el armónico respectivo [8].

3.2.1- Tipos de filtros

El uso de filtros para la reducción de armónicos cumple dos funciones: la primera es como sumidero de corrientes y tensiones armónicas y el otro es proveer al sistema de reactivos para mejorar el factor de potencia, los dos existentes son:

1. Filtros serie.
2. Filtro “Shunt” o paralelos.

3.2.1.1- Filtros serie

Los Filtros Serie evitan el paso de una componente de frecuencia particular, desde la fuente contaminante hacia alguna componente de la planta o parte del sistema de potencia, mediante la presencia de una gran impedancia serie a dicha frecuencia. Estos constan de un inductor y un capacitor en paralelo que se posicionan en serie a la parte de la red que se desea proteger.

3.2.1.2- Filtros “Shunt” o paralelo

Los Filtros Shunt o paralelo proveen un paso alternativo de muy baja impedancia para las frecuencias armónicas, y consisten en una rama resonante serie, compuesta por elementos RLC en conexión paralela con el sistema de alimentación, entre otros [11].

En resumen, los filtros pasivos más usados son los paralelos, en comparación con los serie, debido a que por su conexión son capaces de soportar las corrientes a plena carga y se deben diseñar para esto, en cambio los paralelos solo deben soportar una fracción de esta. Existen varias configuraciones para los filtros paralelo, pero los más empleados son los “filtros sintonizados simples” y los “pasa altos”.

Los filtros sintonizados simples o filtro de corte, es el filtro con mayor uso, debido a su disposición como se observa en la figura (12).

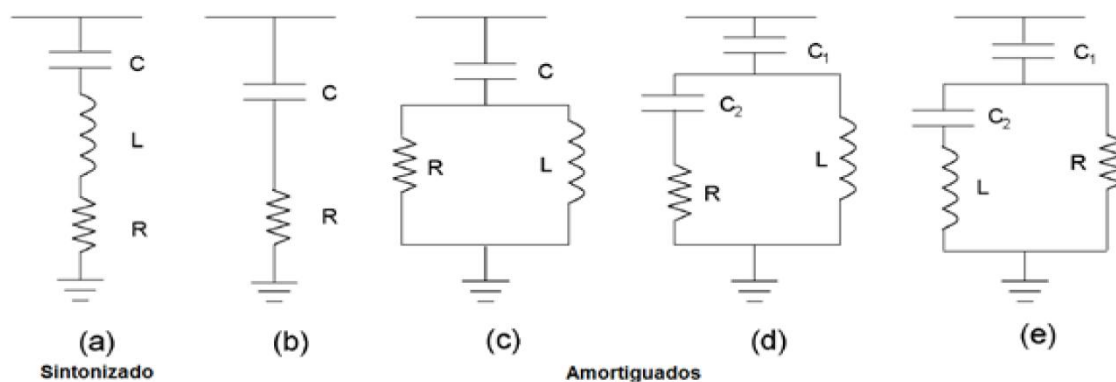


Figura 12. Topología de filtros paralelo: (a) Sintonizado simple (b) Primer orden (c) Segundo orden (d) Tercer orden (e) Tipo C.

Este posee las siguientes características:

1. Se comporta como una baja impedancia a la frecuencia para la cual fue diseñado, dando como resultado un camino más fácil para esa corriente y como tal filtrando la mayor cantidad de armónicos a esa corriente.
2. Cuando la impedancia de la fuente es inductiva, hay un pico de resonancia que siempre ocurre a una frecuencia inferior a la frecuencia para la cual se ajusta el filtro.
3. Cuando aparecen múltiplos de la frecuencia distintos para la cual fue diseñado, esta impedancia toma un valor alto y por ende se convierte en un camino difícil para la corriente de dicho armónico.

De esta manera al momento de diseñar un filtro pasivo se debe tener en cuenta el crecimiento de las cargas no lineales o la reconfiguración del sistema, porque este puede ser expuesto a sobrecargas, generando sobrecalentamientos y daños térmicos. Por este motivo se requiere un conocimiento muy acertado acerca del sistema para el cual se va a implementar el filtro [8].

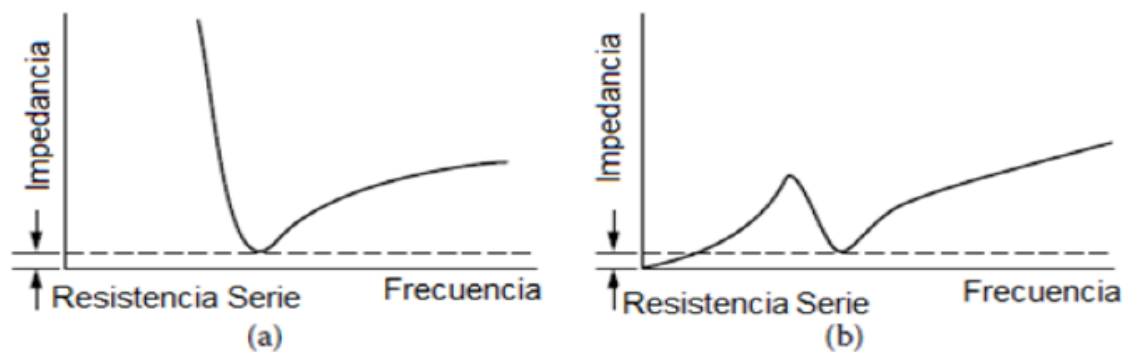


Figura 13. Respuesta típica de un filtro de corte. (a) Filtro solo (b) filtro y sistema.

Este filtro está compuesto por una inductancia y una capacitancia en serie. La resistencia que se ve en la topología es la resistencia intrínseca de las inductancias, la cual se emplea para evitar el sobrecalentamiento de los filtros. Todas las corrientes presentes a la frecuencia para la cual se diseñó el filtro, encontrarán un camino de baja impedancia por este. La frecuencia del filtro se representa mediante la ecuación (3.2.1):

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.2.1)$$

En donde:

f_o es la frecuencia de resonancia del filtro en Hz.

L es la inductancia de filtro en Henry.

C es la capacitancia del filtro en Farad.

Los filtros pasa alto o amortiguados deben su nombre gracias a su característica de baja impedancia por encima de una frecuencia de corte. Este filtro es capaz de absorber un gran porcentaje de todos los armónicos por encima de esta frecuencia.

Con frecuencia, un filtro pasa alto cuya frecuencia de corte se sintoniza al armónico más bajo que ha de eliminarse, se utiliza para todo el filtrado; aunque hay dos factores que se oponen a esta práctica:

- La frecuencia mínima del filtro pasa alto a la frecuencia de corte, nunca alcanzará un valor comparable a la del filtro sintonizado simple.
- El filtrado de los armónicos empleando solo un filtro genera un sobredimensionamiento de los componentes visto desde la componente de la frecuencia fundamental.

3.2.2- Criterio para diseño de filtros pasivos

El proceso para diseñar el filtro requiere especial cuidado, debido a que este será el que se conecte al sistema. Se debe tener en cuenta al momento del diseño factores en el sistema en el cual se va a emplear como, conocimiento de la carga (lo más detallado posible), armónicos que se desean filtrar, factor de potencia deseado, entre otros. Los principales factores a la hora de escoger el filtro son: bajo mantenimiento, economía y fiabilidad. Lo que se busca en la mayoría de los casos es que un filtro con un diseño más simple que sea capaz de realizar la mayor parte del trabajo. A continuación, se enumeran los pasos para el diseño de filtros sintonizados que proporcionen una operación confiable de estos:

1. Como primer paso se debe dimensionar correctamente el capacitor para mejorar el factor de potencia y evitar cobros extras por parte de las empresas de energía. Por lo general este factor de potencia es mayor o igual a 0,95.
2. Se escoge un inductor que entre en resonancia serie con el capacitor a la frecuencia armónica deseada.
3. Calcular la tensión pico en los terminales del condensador y la corriente RMS del reactor
4. Basados en los resultados, escoger los componentes del filtro RLC de acuerdo a los valores comerciales y verificar que el desempeño de este cumpla con lo establecido en el estándar IEEE-18-2006 [11].

3.2.3- Ecuaciones para el diseño

La impedancia del filtro está dada por (3.2.2):

$$Z = R + j \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right] \quad (3.2.2)$$

Donde R, L, C son la resistencia, inductancia y capacitancia de los elementos que componen el filtro y ω es la frecuencia del sistema de potencia [14].

La condición de la resonancia serie se da cuando la parte imaginaria es igual a cero, dando como resultado la parte resistiva solamente. La frecuencia a la cual el filtro se sintoniza está definida por el valor de ω que hace que la inductancia y capacitancia se cancelen en la ecuación. Esta frecuencia está descrita en la ecuación (3.2.1) y la reactancia tanto inductiva como capacitiva armónica viene dada por:

$$X_{Lh} = h\omega L \quad (3.2.3)$$

$$X_{Ch} = \frac{1}{h\omega C} \quad (3.2.4)$$

Si se asume la resistencia cero, la condición de impedancia del filtro dada en (2.6.1.4) caiga a cero, entonces la frecuencia armónica requerida es:

$$X_{Lh} = X_{Ch} \quad (3.2.5)$$

Y sustituyendo la ecuación (2.6.1.5) y (2.6.1.6) en la ecuación (2.6.1.7) y despejando h se tiene:

$$h = \sqrt{\frac{X_{Ch}}{X_{Lh}}} \quad (3.2.6)$$

3.2.4- Resonancia paralela y serie

La interacción del filtro con la impedancia de la fuente (L_S) resulta en una resonancia paralela la cual se caracteriza por un pico elevado. La resonancia paralela, vista por el banco de capacitores (hacia la fuente) viene dada por la ecuación (3.2.7):

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_S + L)C}} \quad (3.2.7)$$

La cual se encuentra debajo de la frecuencia de sintonización del filtro.

En los lugares donde se requiera instalar un filtro paralelo sintonizado, existirá una resonancia paralela para cada filtro. Se evidencia que la frecuencia de resonancia presenta un desplazamiento una vez se cambian los valores de C o de L o los de L_S en la fuente.

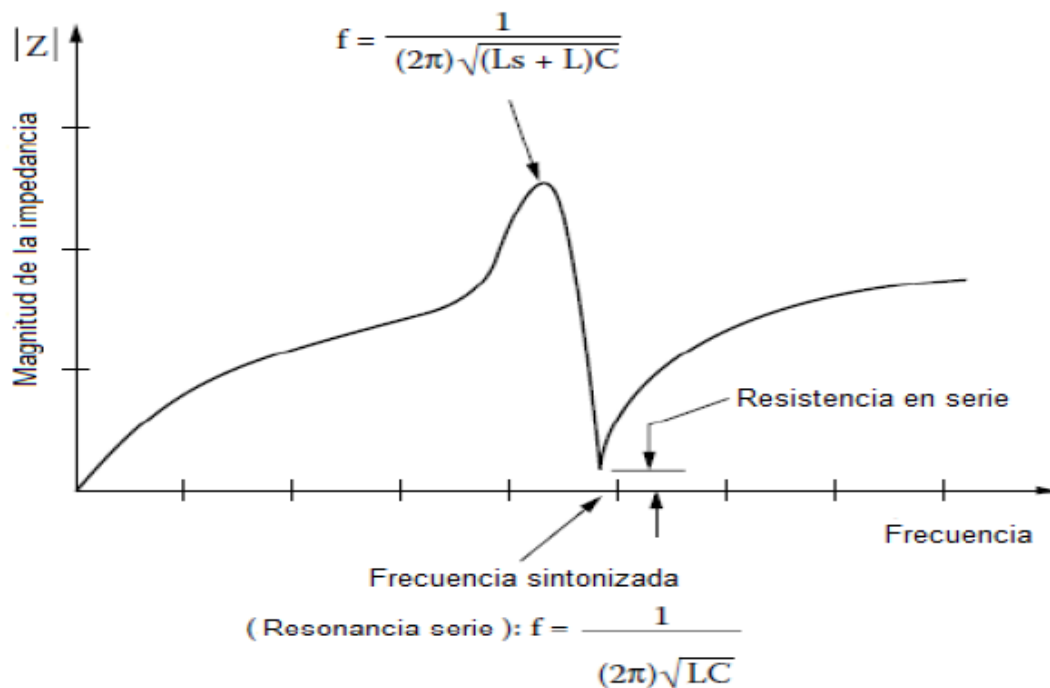


Figura 14. Puntos de resonancia de un filtro sintonizado simple.

Una de las cosas que puede afectar la resonancia paralela es agregar bancos de capacitores para mejorar el factor de potencia inyectando reactivos al sistema. Sin embargo, el impacto más notable de esta impedancia de la fuente sobre el rendimiento del filtro es el pico de impedancia paralelo. Al reducir estos picos de impedancia en paralelo, se reduce la distorsión armónica producida por cualquier componente armónico de frecuencia menor a la frecuencia de sintonización del filtro [9].

El problema que se presenta debido a estas resonancias es una de sintonización del filtro, si esto sucede, entonces habrá un desplazamiento del punto resonante en serie a los valores de frecuencia más altos y se traducirá en un aumento brusco de la impedancia vista por la corriente armónica a esa frecuencia. La causa de esto es por envejecimiento de los capacitores, lo que causa una disminución en su capacitancia. Si el pico de resonancia paralela se desplaza a tal punto que logra alinearse con la frecuencia de algún armónico característico que posea la carga, se amplificará la tensión a tal punto de generar sobrecalentamiento en los conductores y devanados de las máquinas. Los principales aspectos de desintonización son los siguientes:

- La acción de apertura de los fusibles donde están conectados los bancos de capacitores, desconectado uno o más elementos de este, lo cual disminuiría la capacitancia trifásica y por ende aumenta la frecuencia de sintonización del filtro
- La tolerancia del fabricante de los elementos puede dar lugar a un desplazamiento de la frecuencia de sintonía en cualquier dirección.
- Las variaciones de temperatura pueden producir un envejecimiento acelerado de las unidades de condensadores.

- Las variaciones en la topología del sistema, cambian la reactancia inductiva aguas arriba vista desde la ubicación del filtro, también pueden tener un impacto en la ubicación de puntos de resonancia paralela.

En base a los puntos mencionados anteriormente y suponiendo que la fuente va a mantener una impedancia fija, se recomienda sintonizar el filtro a una frecuencia un poco menor a la del armónico que se desea eliminar, dando como margen de un 3 a 5%. Esto representará pequeños cambios en la frecuencia de sintonía a valores más altos de frecuencia con el tiempo, permitiendo así que este se comporte siempre como un camino de baja impedancia.

3.2.5- Factor de calidad (Q)

El factor de calidad se refiere a la capacidad que posee un filtro para disipar la energía absorbida a la frecuencia sintonizada. La IEEE define el factor de calidad como la relación de la frecuencia de resonancia, ω_θ , entre el ancho de banda de esas frecuencias a lados opuestos de la frecuencia de resonancia, en donde la respuesta de la estructura resonante difiere 3 dB desde esta frecuencia. En la serie RLC, se puede definir el factor de calidad como (3.2.8):

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{X_{Lh}}{R} = \frac{X_{Ch}}{R} \quad (3.2.8)$$

En donde X_{Ch} y X_{Lh} son las reactancias capacitiva e inductiva respectivamente a la frecuencia de resonancia del filtro. En algunas literaturas se sugiere que los valores de Q estén entre 15 y 80 para los filtros que se emplean en la industria, otras sugieren entre 20 y 30 [11].

Los siguientes puntos resumen los aspectos más relevantes del factor de calidad para filtros sintonizados simples:

- Generalmente la resistencia del filtro es la resistencia del inductor. Sin embargo, R se puede emplear para variar el factor de calidad del filtro y poder controlar la cantidad de corrientes armónicas que circulan a través de él.
- Un gran valor de Q implica un valle a la frecuencia de resonancia del filtro, por lo que se captarán más frecuencias armónicas
- La reducción armónica se logra con la implementación de valores altos de Q. sin embargo las corrientes armónicas de frecuencias distintas son de cuidado, debido a que son distintas para la cual se sintoniza el filtro, ya que también encuentran una ruta de menor impedancia, dando como resultado disipación térmica.
- Los filtros con bajo factor de calidad se pueden emplear en situaciones en las cuales la distorsión armónica apenas supera los límites permitidos y solo se requiera poca filtración.

3.2.6- Valores de funcionamiento recomendadas para los componentes del filtro.

3.2.6.1- Condensadores

Los bancos de capacitores son los elementos más sensibles a la tensión que componen el filtro por las siguientes razones:

- Se exponen a un pico de tensión cuando existe distorsión de la onda producido por fuentes armónicas.
- La salida de potencia reactiva del capacitor cambiará con el cuadrado de la relación de la tensión rms distorsionada y la tensión rms sin distorsiones.
- En situaciones en las que se presenten frecuentemente sobretensiones por conmutación, los capacitores del filtro pueden estar expuestos a daños.

La IEEE-18-2002 [11] recomienda los límites para garantizar un buen funcionamiento y durabilidad de los capacitores en derivación. Siguiendo dichas recomendaciones, los capacitores se deben diseñar para operar por debajo a su nivel nominal y ser capaces de funcionar bajo condiciones de contingencias siempre y cuando no exceda los límites establecidos en el estándar.

Tensión RMS	110%
Tensión pico + Armónicos	120%
Corriente RMS	135%
Potencia reactiva nominal	135%
Calentamiento del dieléctrico	135%

Tabla 1. Límites máximos recomendados para operación de capacitores en paralelo bajo condiciones de contingencia.

3.2.6.2- Inductores de sintonización

La elevación de la tensión máxima al inductor también se debe determinar. Los parámetros por lo general incluyen las siguientes especificaciones:

- Corriente a 50/60Hz
- Espectro de corriente armónica
- Corriente de cortocircuito
- Razón $\frac{X}{R}$
- Tensión del sistema
- BIL (nivel de aislamiento básico)

Los inductores empleados en los filtros en muchos casos se diseñan con núcleo de aire. Lo que proporciona características lineales entre frecuencia y corriente. La relación $\frac{X}{R}$, a 60Hz, es normalmente menor a 150, lo que permite escoger un factor de calidad deseado como se describió anteriormente. Además, el inductor debe tener la capacidad de manejar la sobretensión impuesta bajo una condición de cortocircuito, como en el caso donde el capacitor falle. El BIL de este y del banco de capacitores debe ser el mismo que el del transformador de potencia que alimenta la carga, donde los filtros se encuentran instalados [11].

4- Método sistemático para el diseño de filtros pasivos

4.1- Introducción

A continuación, se propone una metodología utilizada en [14] con el fin de lograr diseñar y dimensionar correctamente los filtros que se deben emplear en el sistema debido a las corrientes armónicas generadas por las cargas no lineales, las cuales distorsionan la onda generando inconvenientes y mal funcionamiento de los equipos. Esta metodología se implementó utilizando los valores recomendados en los estándares IEEE-519-1992 [13] y IEEE-18-2002 [11]. En este documento se analizaron dos casos como sistemas de prueba, uno de nueve nodos y el otro de ocho nodos, los cuales poseen dos cargas no lineales, una es un rectificador trifásico o una empresa de fundición y la otra es un compensador estático, que es un arreglo de capacitores controlado por tiristores (TCR) y además posee dos bancos de capacitores para mejorar el factor de potencia para el caso de nueve nodos. Los valores base del sistema son 100MVA y 230KV. Para el sistema de ocho nodos se emplearon los valores base de 1MVA y 13,2KV.

El primer paso para saber en qué condiciones se encontraba el sistema fue correr el flujo de potencia convencional para hallar el estado inicial del sistema, tanto potencia activa y reactiva generada como la demandada, también para conocer los valores de tensiones y corrientes en los nodos y los elementos. Luego se corrió el programa de inyección de corrientes para verificar cuáles eran las componentes armónicas y ver que armónicos se estaban inyectando al sistema, tanto en magnitud y ángulo, además se verifica la distorsión armónica en cada uno de los nodos. Finalmente se corrió el barrido en frecuencia con el fin de determinar la resonancia presente en el sistema debido a los elementos conectados a este, buscando picos y valles en los diagramas de frecuencia.

4.2- Metodología

Para el desarrollo de este sistema se obtuvo la mayor información posible empleando los modelos matemáticos descritos anteriormente obteniendo información de las líneas de transmisión, transformadores, generadores, cargas lineales y cargas no lineales, compensadores estáticos y compensadores de reactivos, tomando como base las referencias [9] y [13] y con ayuda del software Matlab se implementaron los siguientes métodos [14]:

4.2.1- Flujo de potencia convencional

Este método se emplea solo la primera vez y se corre con el fin de calcular las tensiones y ángulos a los cuales se encuentra el sistema y con estos se ajustan los siguientes métodos.

4.2.2- Inyección de corrientes

En este método se encuentra la matriz Ybus para cada armónico inyectado por las cargas no lineales y un vector de corrientes armónicas, la cual será la del valor de los nodos donde están conectadas las cargas no lineales.

Para poder obtener estas tensiones se invierte la Ybus para calcular la Zbus con el fin de aplicar la ecuación (4.1) y por medio de esta se obtienen los niveles de distorsión armónica total y poder compararlos con los establecidos en el estandar [13]:

$$V_h = Z_h I_h \quad (4.2.1)$$

$$Z_h = Y_h^{-1}$$

$$THD_V = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} \quad (4.2.2)$$

Con la ecuación (4.2.2) es posible calcular la distorsión armónica total de la tensión debido a estas cargas no lineales.

4.2.3- Barrido en frecuencia

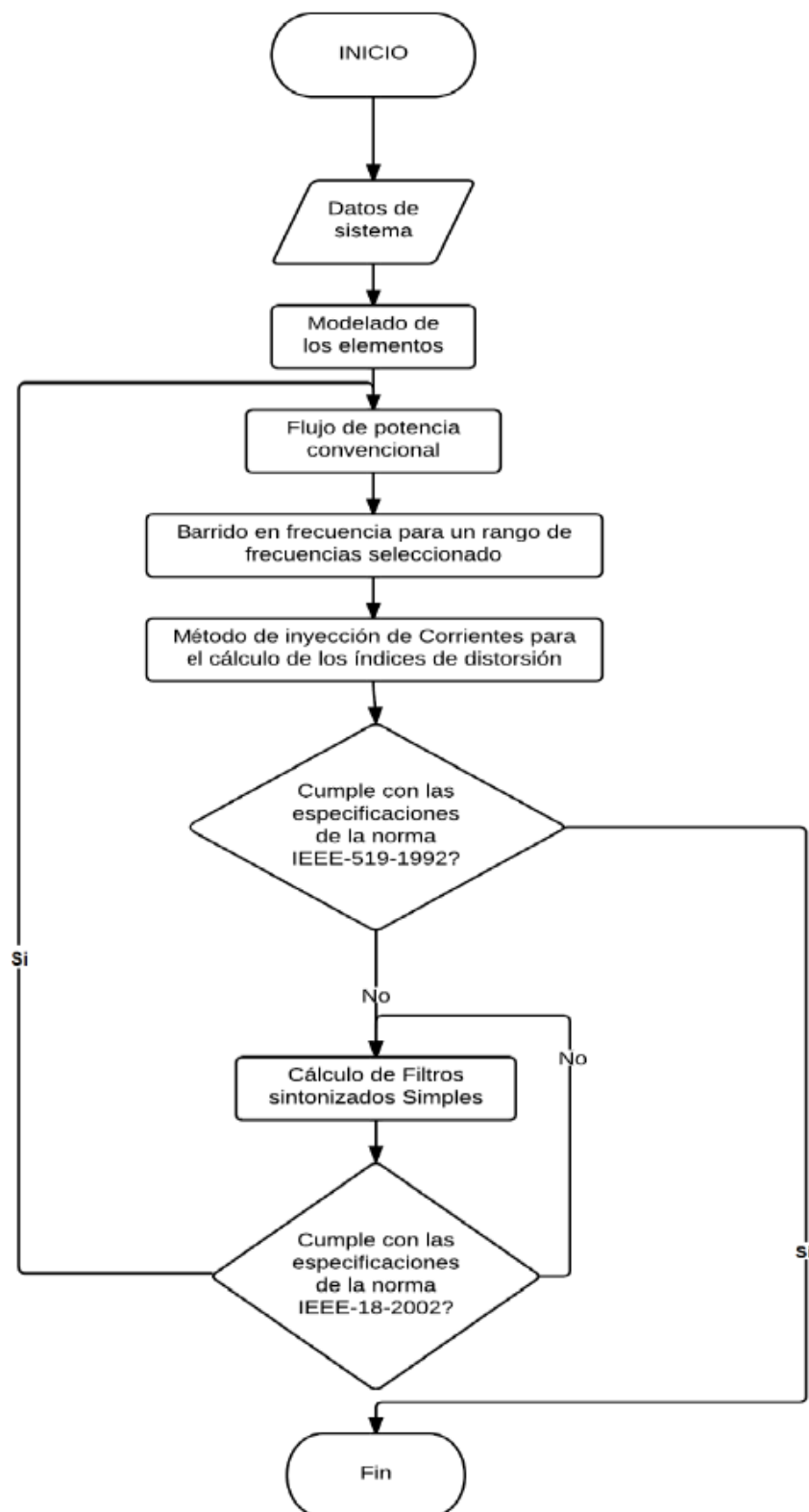
El barrido en frecuencia consiste en conformar la Ybus para un rango de frecuencias en específico, para este caso será desde el armónico fundamental hasta el armónico 50 en pasos de 0.1. para emplear bien este método es necesario describir todos los elementos del sistema, tanto los de potencia como las cargas lineales conectadas a este sean descritos por los modelos matemáticos explicados anteriormente en el capítulo 2.

Una vez se obtiene la Ybus para el rango ya descrito, se invierte para calcular la Zbus y así obtener las impedancias de Thevenin o el “Driving Point Impedance” para el rango de frecuencias armónicas.

4.2.4- Diseño de filtros sintonizados simples

Para diseñar los filtros sintonizados se tendrán en cuenta dos casos: cuando en el nodo existen bancos de capacitores conectados para mejorar el factor de potencia o cuando no haya ninguno conectado.

4.2.5- Diagrama de flujo



5- Casos de estudio

5.1- Sistema de prueba de nueve nodos IEEE

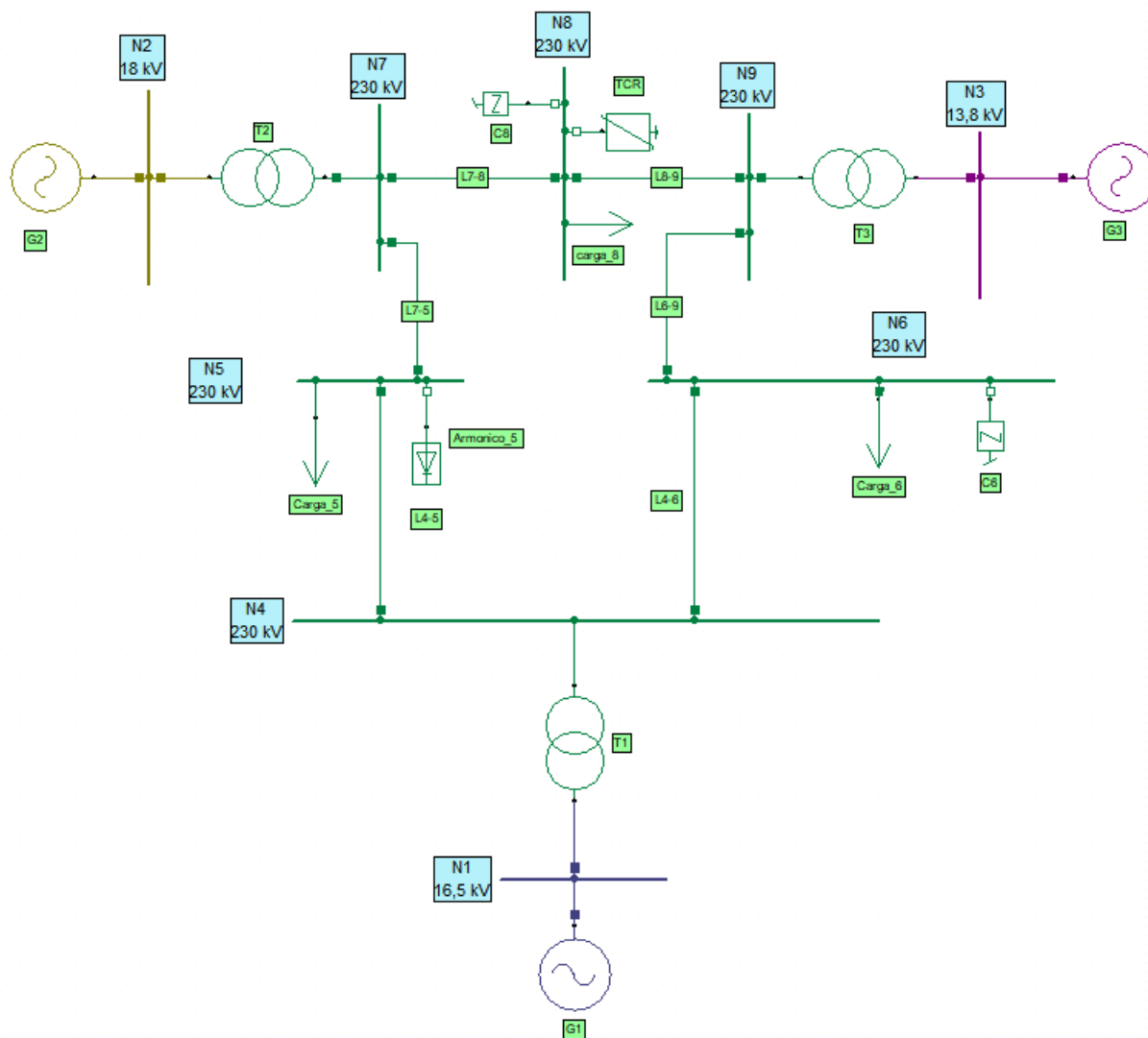


Figura 15. Sistema de prueba de 9 nodos IEEE.

Los datos del sistema se muestran en las siguientes tablas:

Nodos	$V_{nominal}$ [KV]	V_{min} (%)	V_{max} [%]	Tipo	$V_{operacion}$ [%]	P_d [MW]	Q_d [MVar]
1	16,5	90	110	SL	104	0	0
2	18	90	110	PV	102,5	0	0
3	13,8	90	110	PV	102,5	0	0
4	230	90	110	PQ	0	0	0
5	230	90	110	PQ	0	125	50
6	230	90	110	PQ	0	90	30
7	230	90	110	PQ	0	0	0
8	230	90	110	PQ	0	100	35
9	230	90	110	PQ	0	0	0

Tabla 2. Datos de los nodos y las cargas.

Nodo	$V_{nominal}$ [KV]	$S_{nominal}$ [MVA]	$P_{operacion}$ [MW]
1	16,45	247,5	0
2	18	192	163
3	13,8	128	85

Tabla 3. Datos de generación.

Tramo	R (P.U.)	X (P.U.)	B (P.U.)
4-5	0,1	0,085	0,176
4-6	0,017	0,092	0,158
5-7	0,032	0,161	0,306
6-9	0,039	0,17	0,358
7-8	0,0085	0,072	0,149
9-8	0,0119	0,1008	0,209

Tabla 4. Datos de las líneas

Nodo	R	X_c	X_L
6	0	1,5	0
8	0	3	0

Tabla 5. Datos de banco de capacitores.

Orden armónico	Empresa Fundidora		TCR	
	Magnitud [%]	Angulo [°]	Magnitud [%]	Angulo [°]
1	100	0	100	0
5	0	0	25	180
7	0	0	15	0
11	15	75	10	180
13	3	20	5	0

Tabla 6. Datos de las cargas no lineales.

5.2- Sistema de prueba de ocho nodos IEEE

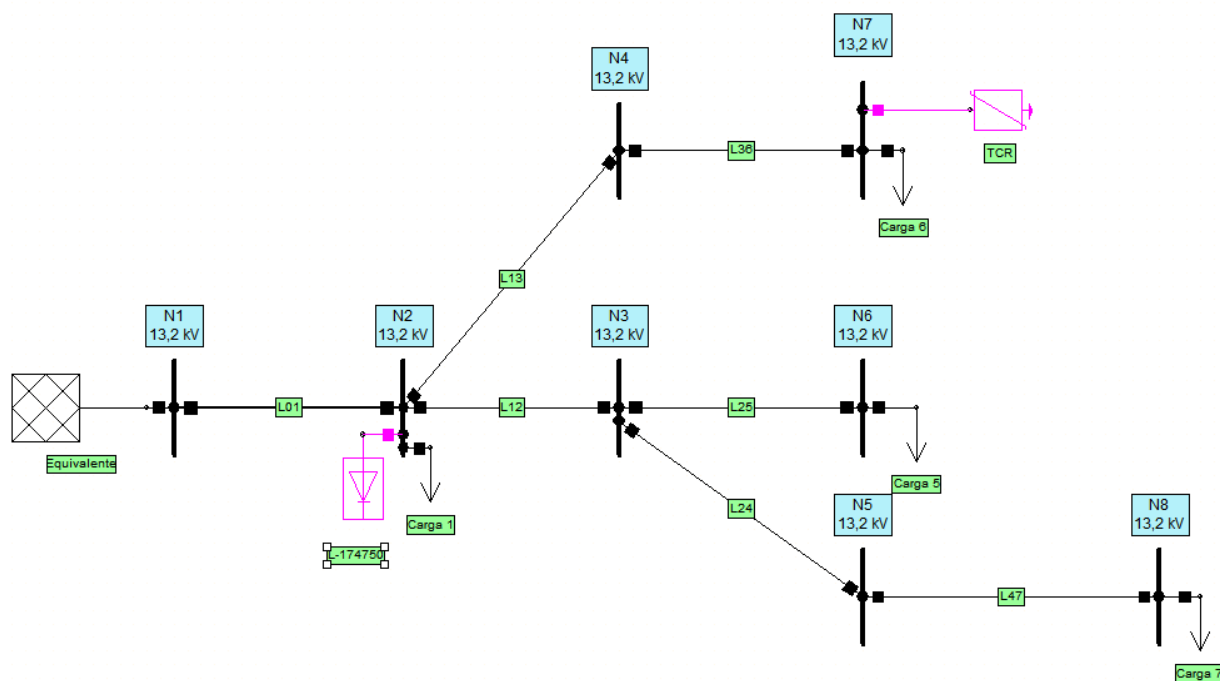


Figura 16. Sistema de prueba de 8 nodos IEEE.

Los datos de este sistema se encuentran en las siguientes tablas:

Nodo	$V_{nominal}[KV]$	$V_{min}[\%]$	$V_{max}[\%]$	Tipo	$V_{operacion}[\%]$	$S_d[KVA]$	FP
1	13,2	95	105	SL	100	0	
2	13,2	95	105	PQ		750	0,9
3	13,2	95	105	PQ		0	
4	13,2	95	105	PQ		0	
5	13,2	95	105	PQ		0	
6	13,2	95	105	PQ		3000	0,7
7	13,2	95	105	PQ		750	0,8
8	13,2	95	105	PQ		250	0,8

Tabla 7. Datos de los nodos y las cargas.

Tramo	R (P.U.)	X (P.U.)	B (P.U.)
1-2	1,07346189	0,61983471	0
2-3	0,80509642	0,46487603	0
3-6	0,42938476	0,24793388	0
2-4	0,80509642	0,46487603	0
4-7	0,21469238	0,12396694	0
3-5	0,26836547	0,15495868	0
5-8	0,53673095	0,30991736	0

Tabla 8. Datos de las líneas.

Orden armónico	Empresa Fundidora		TCR	
	Magnitud [%]	Angulo [°]	Magnitud [%]	Angulo [°]
1	100	0	100	0
5	0	0	25	180
7	0	0	15	0
11	15	75	10	180
13	3	20	5	0

Tabla 9. Datos de las cargas no lineales.

6- Resultados

6.1- Resultados simulaciones para sistema de prueba IEEE nueve nodos

6.1.1- Flujo de potencia armónico

En la siguiente tabla se observan los valores que el programa realizado en Matlab sobre flujo de potencia convencional, el cual convergió en 4 iteraciones.

Nodo	V [P.U.]	Angulo [°]	P_d [MW]	Q_d [MVar]	P_g [MW]	Q_g [MVar]
1	1,040	0	0	0	71,314	-31,324
2	1,025	8,861	0	0	163	-43,223
3	1,025	4,438	0	0	85	-63,618
4	1,058	-2,139	0	0	0	0
5	1,044	-3,866	125	50	0	0
6	1,063	-3,665	90	30	0	0
7	1,056	3,461	0	0	0	0
8	1,055	0,606	100	35	0	0
9	1,062	1,816	0	0	0	0

Tabla 10. Resultados de los nodos del sistema.

Con los resultados obtenidos en la tabla 10 se procede a emplear el método de inyección de corrientes para ver la distorsión armónica y los valores en magnitud y ángulo de las corrientes armónicas.

En la siguiente tabla se puede observar el valor de las corrientes armónicas producidas a partir de estas cargas no lineales en cada uno de los nodos en magnitud y ángulo.

Nodo	Fundamental		Armónico 5		Armónico 7	
	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]
1	1,04	40,11	0,0001	85,61	0,0001	106,59
2	1,025	86,62	0,004	-157,72	0,0044	-66,32
3	1,025	87,53	0,0042	-172,48	0,007	-75,75
4	1,058	85,01	0,0624	109,66	0,0281	127,26
5	1,044	81,53	0,0772	110,11	0,0149	131,58
6	1,063	85,16	0,0978	108,34	0,0451	125,49
7	1,056	87,15	0,0545	-157,49	0,0589	-66,12
8	1,055	84,65	0,0995	-137,13	0,0599	-63,3
9	1,062	88,06	0,0534	-172,24	0,0895	-75,55

Nodo	Armónico 11		Armónico 13	
	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]
1	0,0001	-62,18	0	105,7
2	0,0092	7,08	0,0008	108,34
3	0,0041	5	0,0004	107,11
4	0,0420	-45,43	0,0083	121,17
5	0,0152	-10,14	0,0099	-60,95
6	0,0173	162,81	0,0018	-56,68
7	0,1238	7,24	0,0113	108,49
8	0,1861	-174,69	0,03	-74,06
9	0,0523	5,16	0,0048	107,25

Tabla 11: Datos de corrientes armónicas en los nodos.

Con los datos de la tabla 11 se calcula tanto el THDI como el THDV para cada nodo, los cuales se observan en la siguiente tabla:

Nodo	THDV [%]	THDI [%]
1	0,02	0
2	1,11	0
3	0,92	0
4	8,21	0
5	11,17	18
6	10,56	0
7	14,56	0
8	21,91	55
9	11,27	0

Tabla 12. Datos del THDV y THDI.

En la siguiente grafica se puede observar las tensiones fundamentales y las inyectadas por las cargas armónicas en su respectivo armónico en cada nodo.

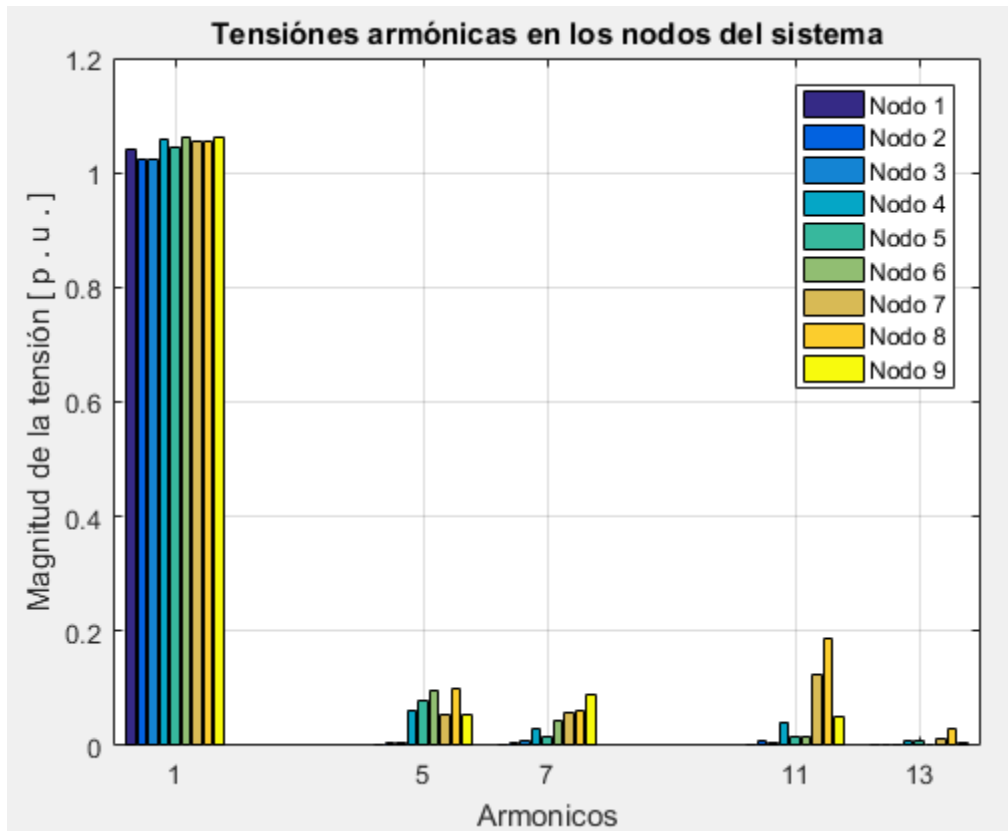


Figura 17. Tensiones armónicas.

En esa grafica se puede observar como las cargas no lineales generan picos de tensión para cada uno de los armónicos analizado; se observa que el armónico más cercano al fundamental que en este caso es el quinto, aumenta la tensión en esos nodos, generando inconvenientes y distorsionando la onda como se observa en las siguientes figuras:

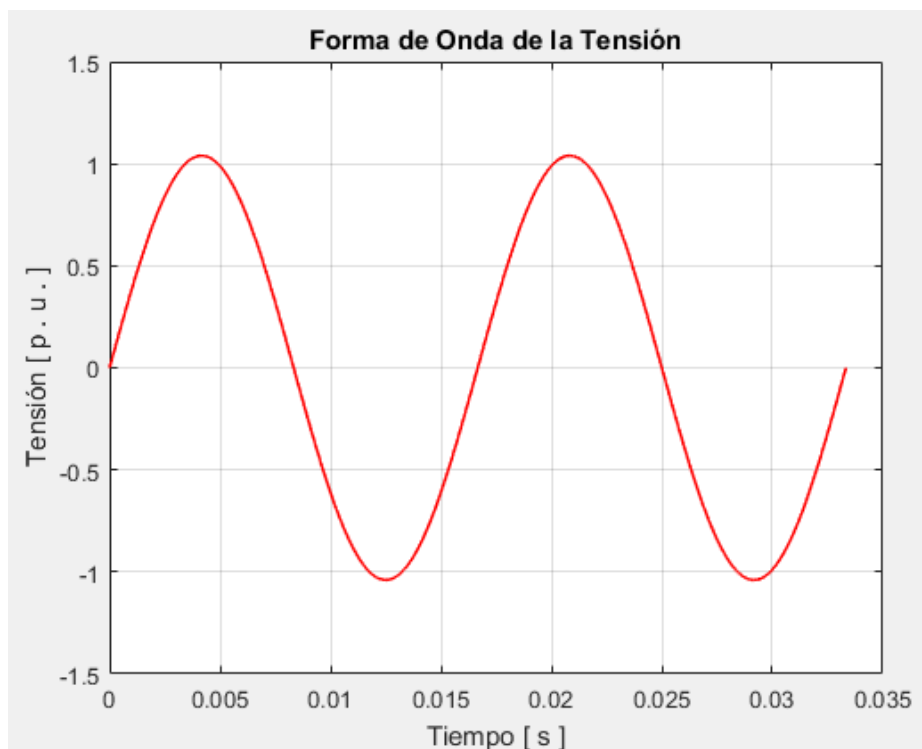


Figura 18. Forma de onda del generador 1.

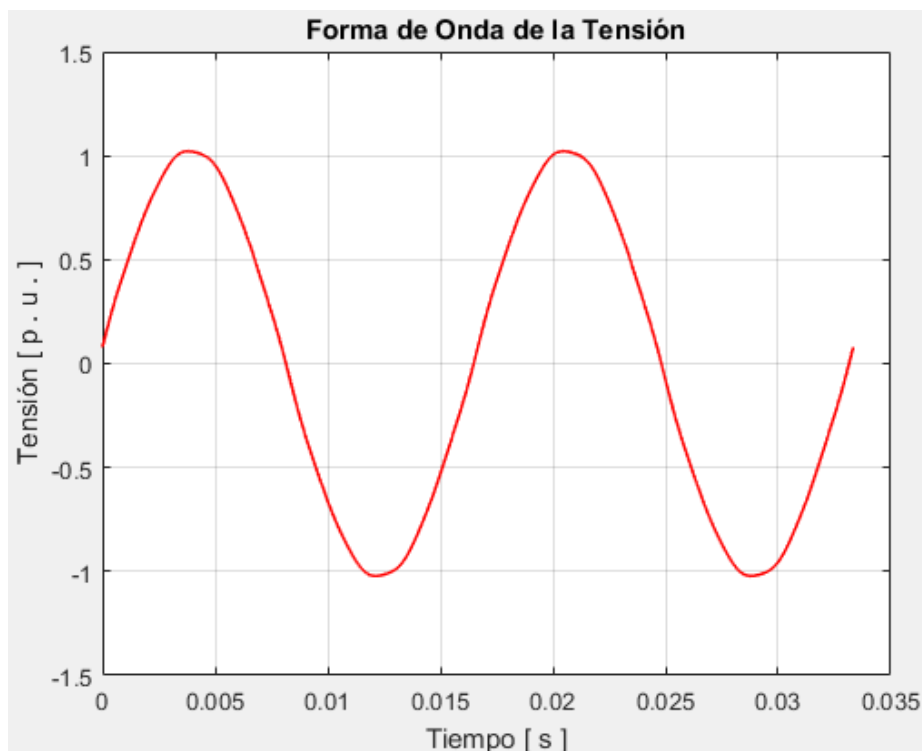


Figura 19. Forma de onda del generador 2.

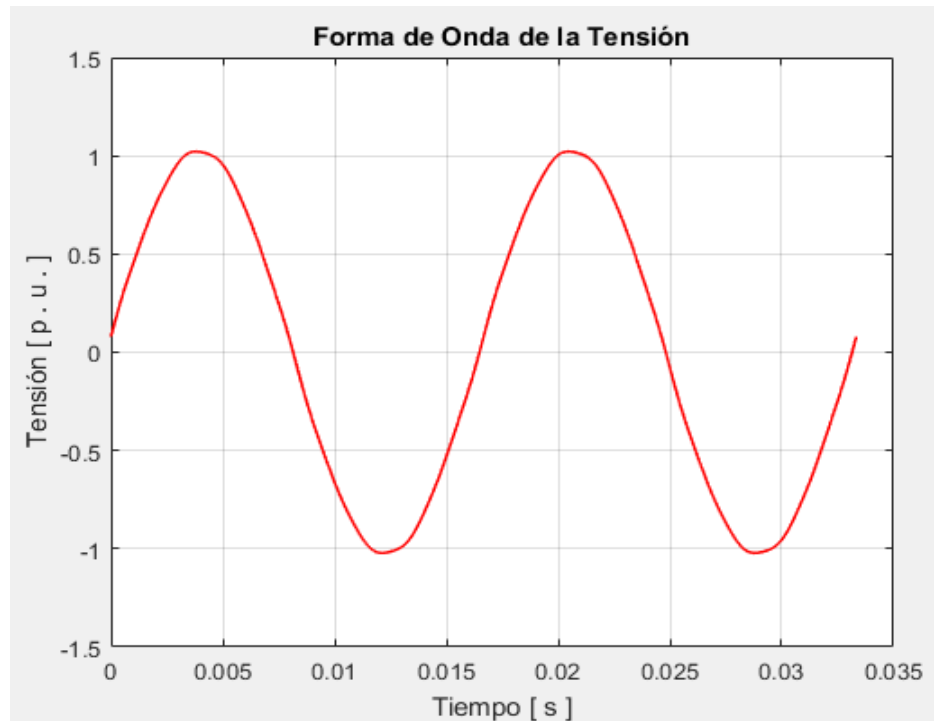


Figura 20. Forma de onda generador 3.

En el nodo 1, figura (18), se observa que la forma de onda es puramente sinusoidal, no presenta distorsión por armónicos, esto se debe a que los generadores siempre van a mantener a su salida una forma de onda sinusoidal y para este sistema también se aprecia que las cargas no lineales, las cuales generan las distorsiones, están conectadas en nodos lejanos a estos, dando como resultado una onda más pura.

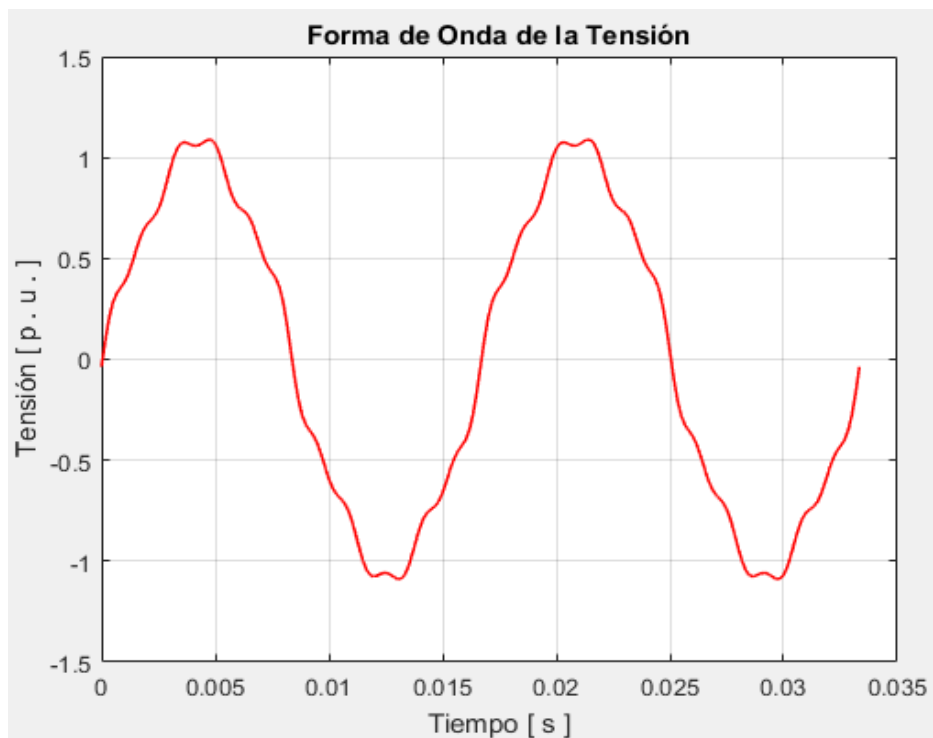


Figura 21. Forma de onda nodo 4.

En el nodo 4, figura (21), se presenta una distorsión de la onda producto de las cargas no lineales, dando como resultado un THDV de 8,21%, y sus magnitudes de corrientes armónicas de 0,0624; 0,0281; 0,0420 y 0,0083 todas en PU para 5°, 7°, 11° y 13° armónico respectivamente, evidenciando que están por encima del estándar [13]. Esto se observa antes de implementar el filtro. Los demás nodos que presenten distorsión armónica se podrán verificar en las tablas 11 y 12.

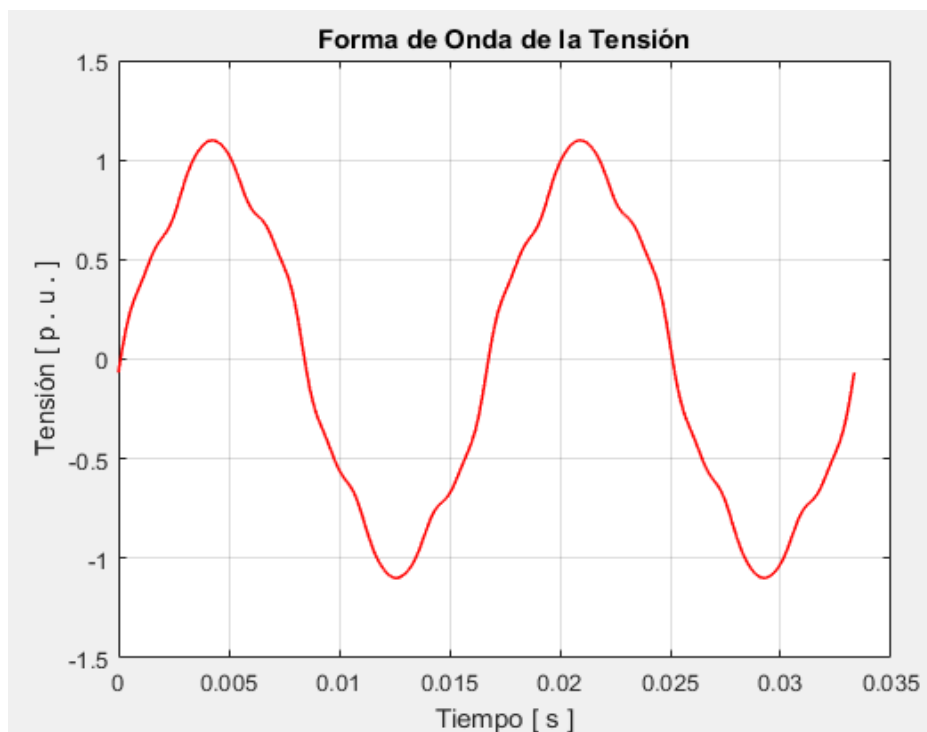


Figura 22. Forma de onda nodo 5.

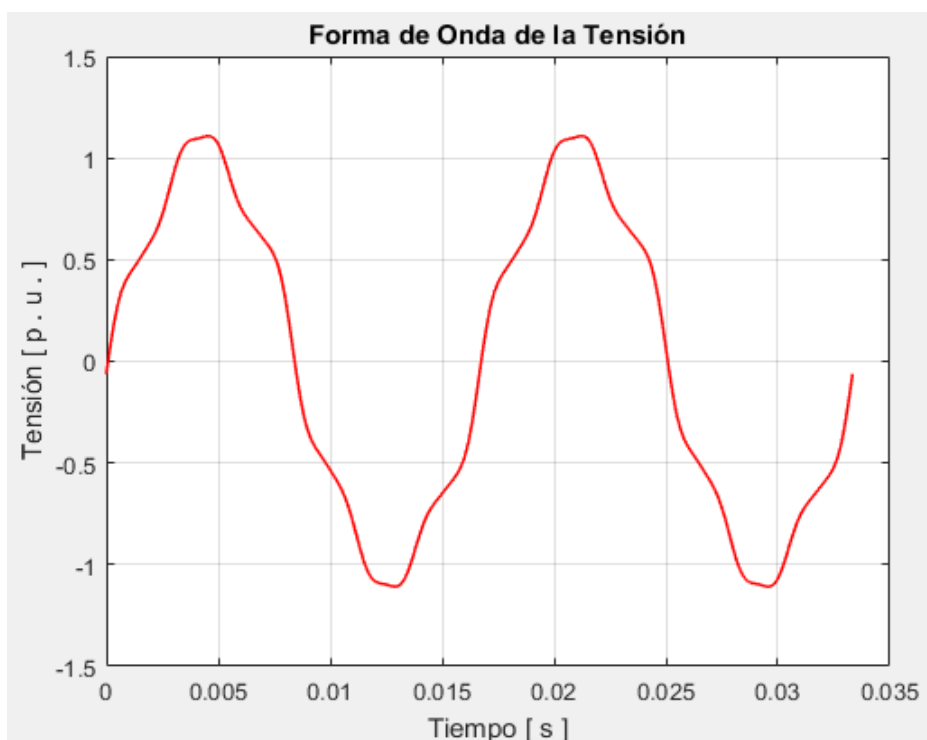


Figura 23. Forma de onda nodo 6.

En estas graficas se ve como las cargas no lineales afectan todo el sistema, distorsionando la forma de onda de todo el sistema.

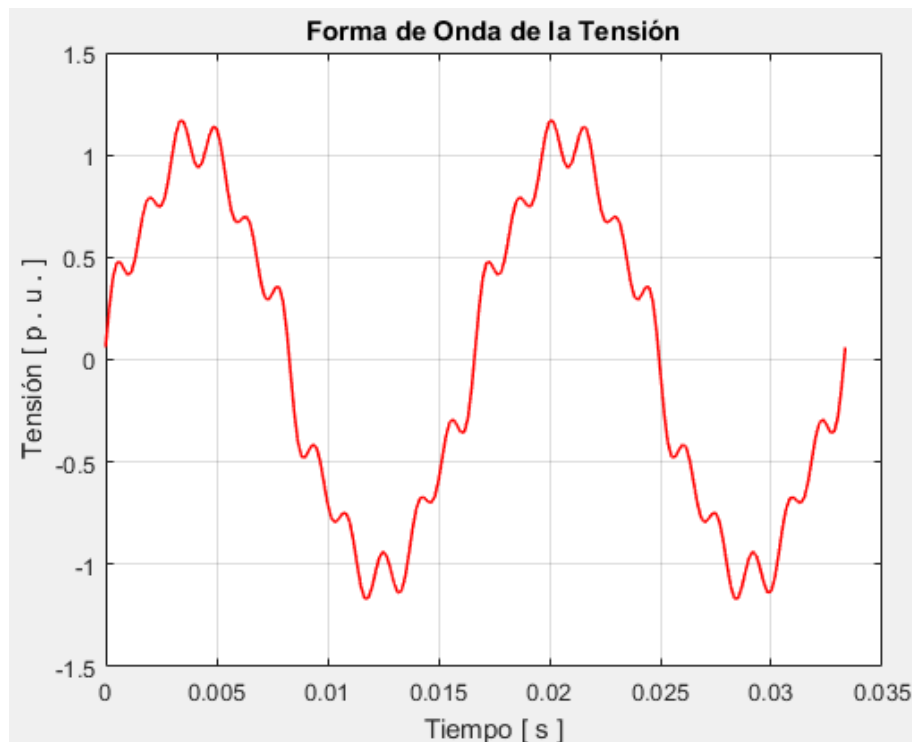


Figura 24. Forma de onda nodo 7.

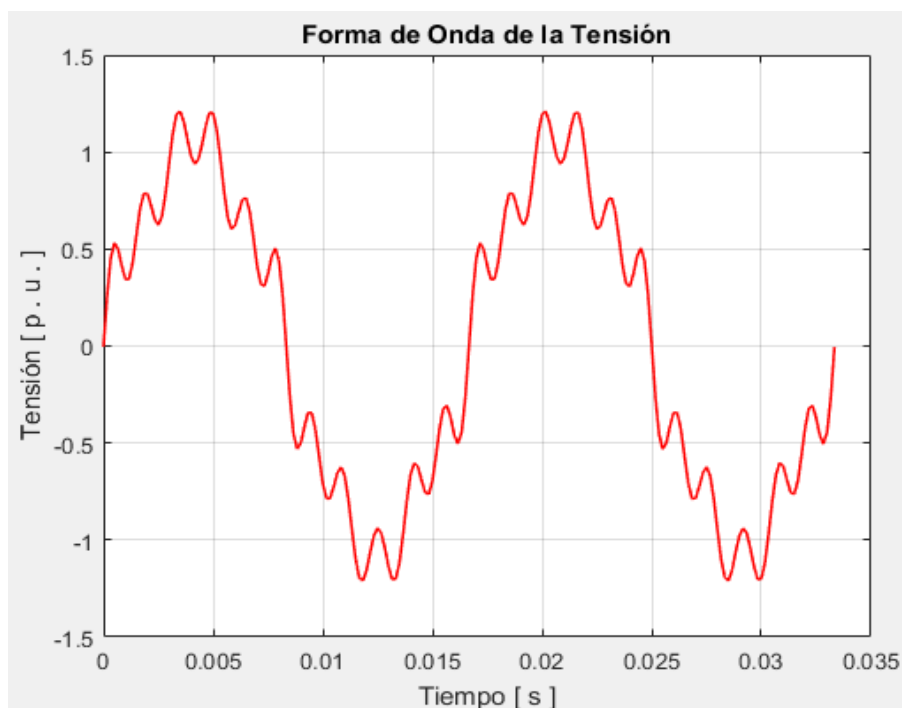


Figura 25. Forma de onda nodo 8.

En los nodos 7 y 8, figuras (24) y (25), se hace evidente la distorsión armónica generada por las cargas, se observa claramente una distorsión bastante grande, la cual genera grandes inconvenientes para el sistema al momento de transportar la energía, ya que estos picos que se observan en la graficas son capaces de hacer que los conductores se calienten, se saturen los transformadores, existan falsos disparos de las protecciones y un mal funcionamiento de los equipos conectados a esta red.

En la siguiente figura se observa una disminución en los picos y en la distorsión de la onda, esto se debe a que este nodo se encuentra cerca de una carga no lineal y por ende se ve afectado por la misma.

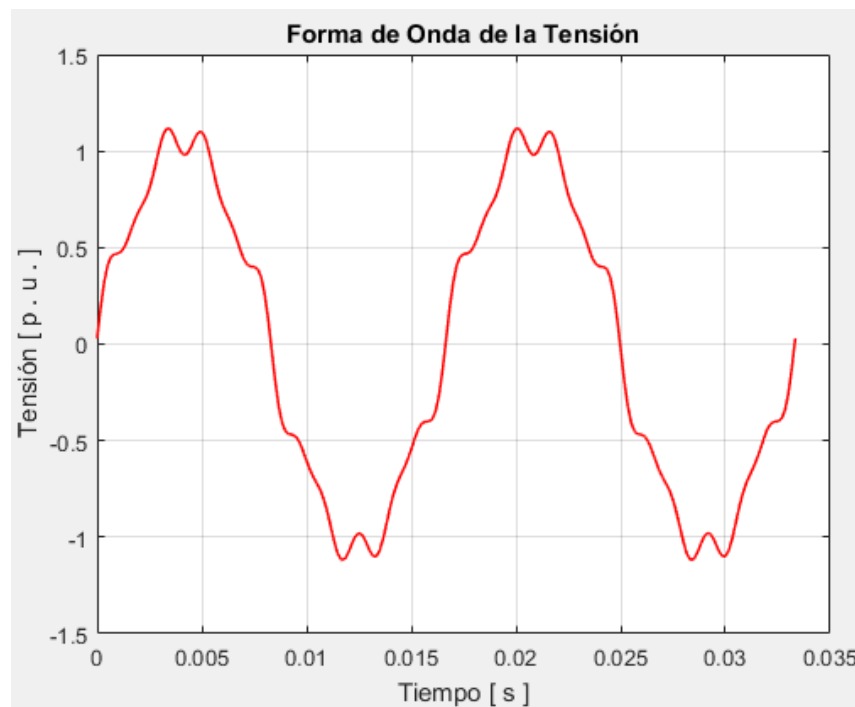


Figura 26. Forma de onda nodo 9.

6.1.2- Barrido en frecuencia

Este método se corre con el fin de verificar el estado de resonancia del sistema, que nodos presentan resonancias en paralelo y cuales en serie. Para eso se corre el programa desarrollado en el software Matlab, empezando por la frecuencia fundamental hasta llegar al armónico 50 (3000Hz).

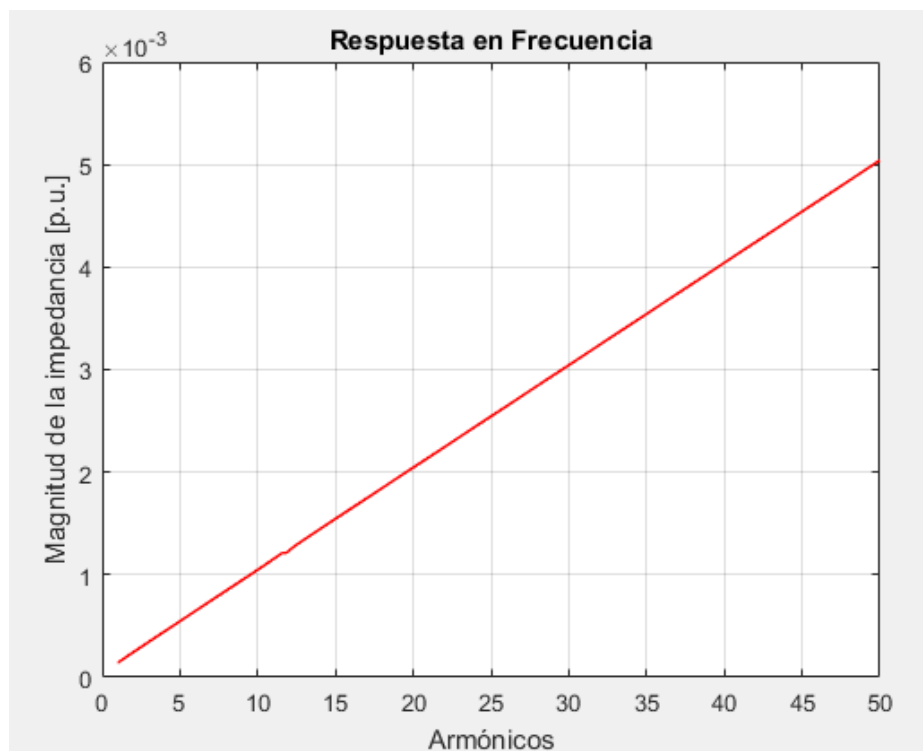


Figura 27. Respuesta en frecuencia nodo 1.

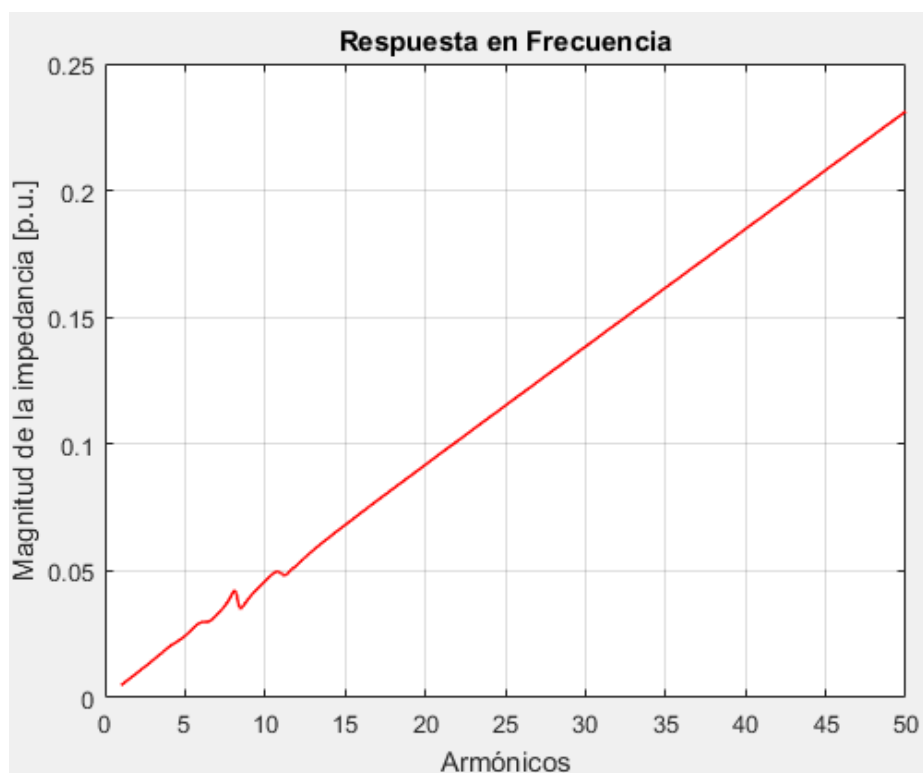


Figura 28. Respuesta en frecuencia nodo 2.



Figura 29. Respuesta en frecuencia nodo 3.

En las gráficas anteriores se observa que hay poca resonancia en el sistema, debido a que este nodo está conectada la generación y están alejados de los nodos donde se encuentran las cargas armónicas, por esto se hace evidente que los picos son pequeños y por lo tanto no hay aumento en las tensiones.

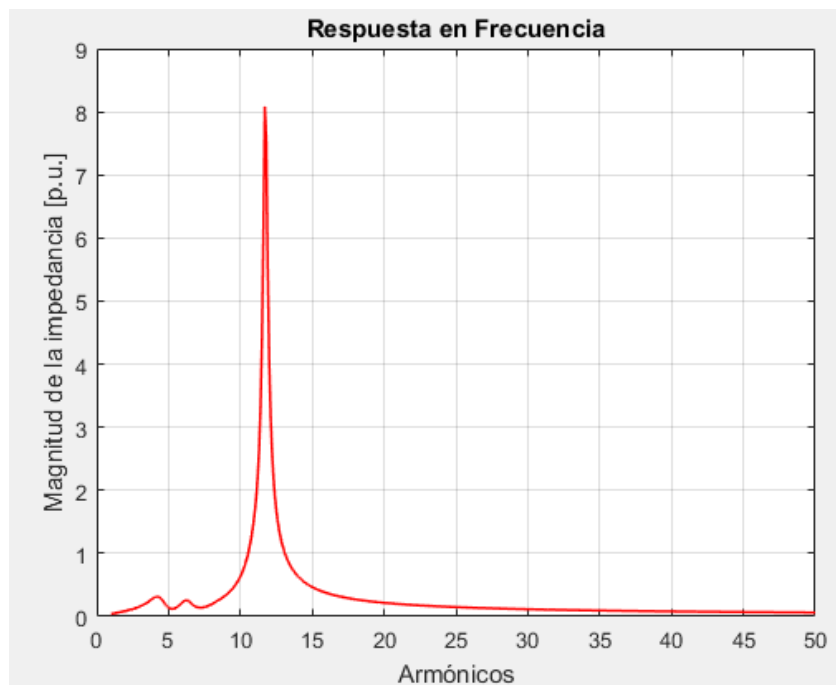


Figura 30. Respuesta en frecuencia nodo 4.

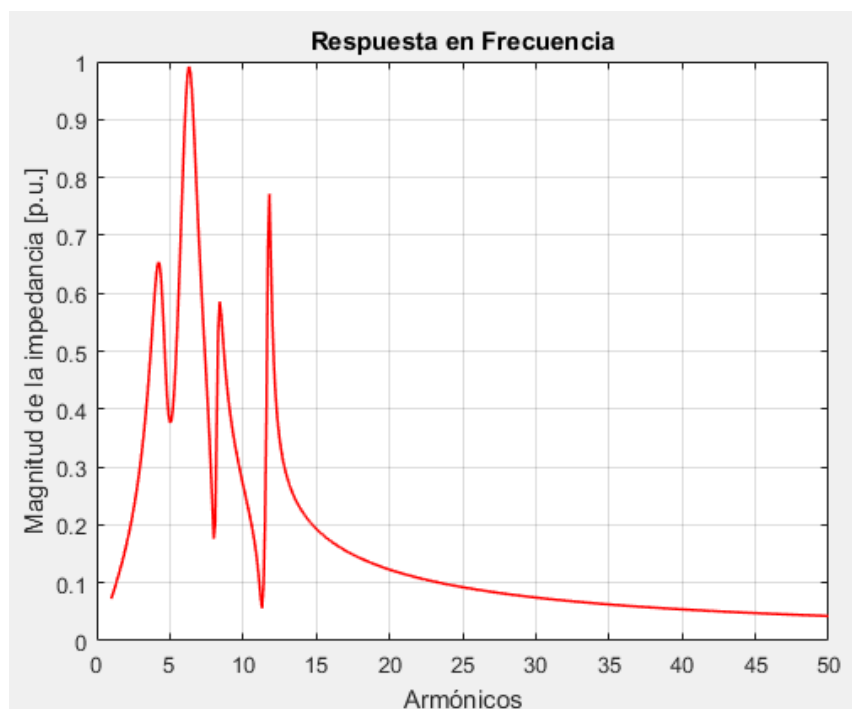


Figura 31. Respuesta en frecuencia nodo 5

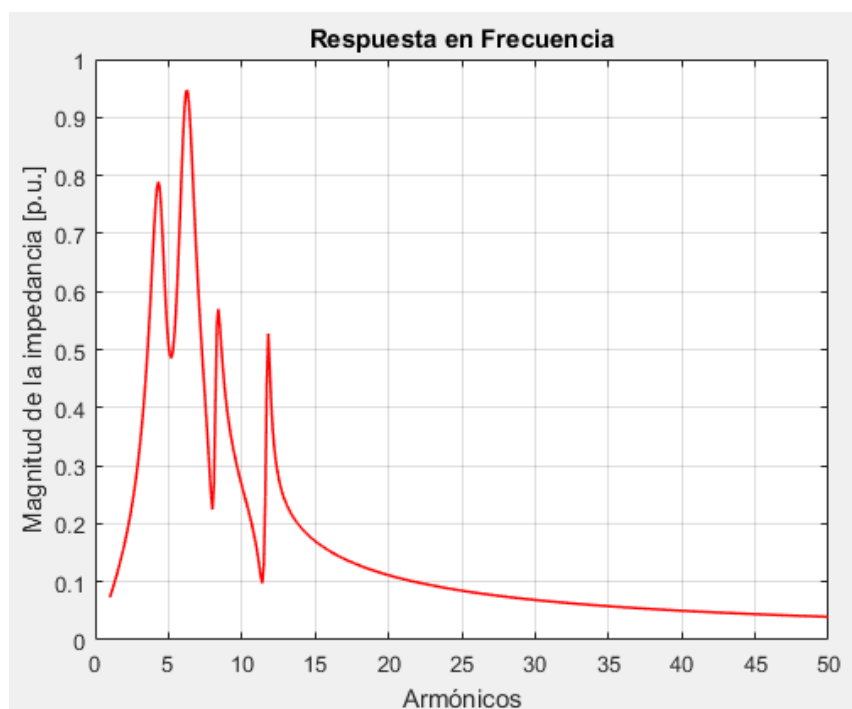


Figura 32. Respuesta en frecuencia nodo 6

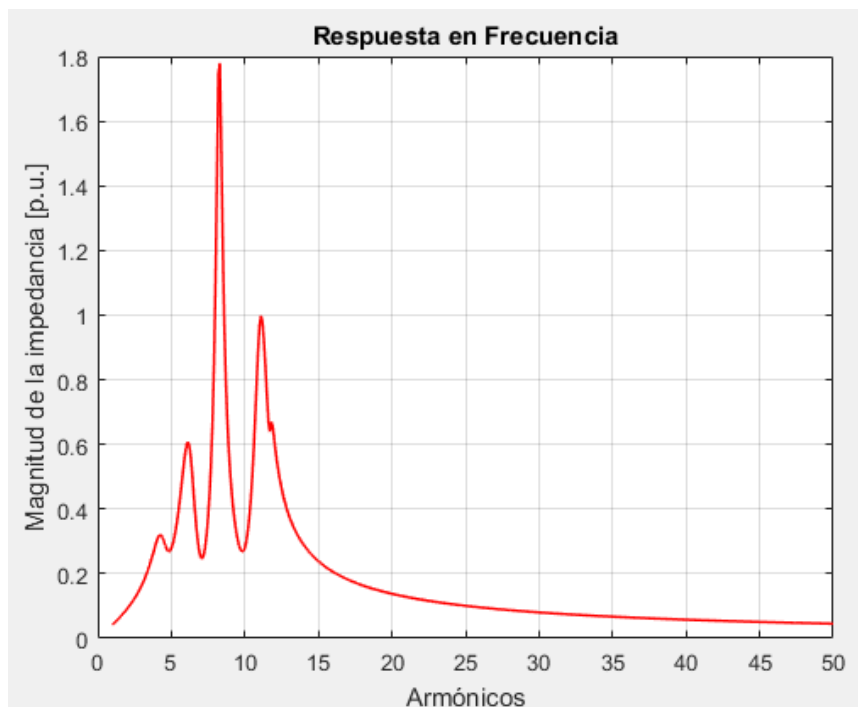


Figura 33. Respuesta en frecuencia nodo 7.

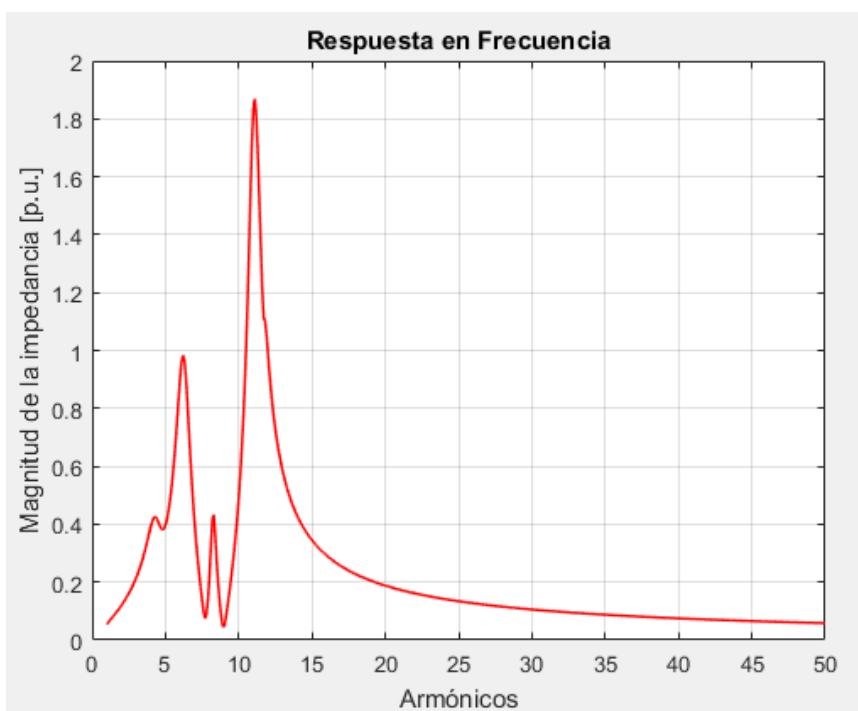


Figura 34. Respuesta en frecuencia nodo 8.

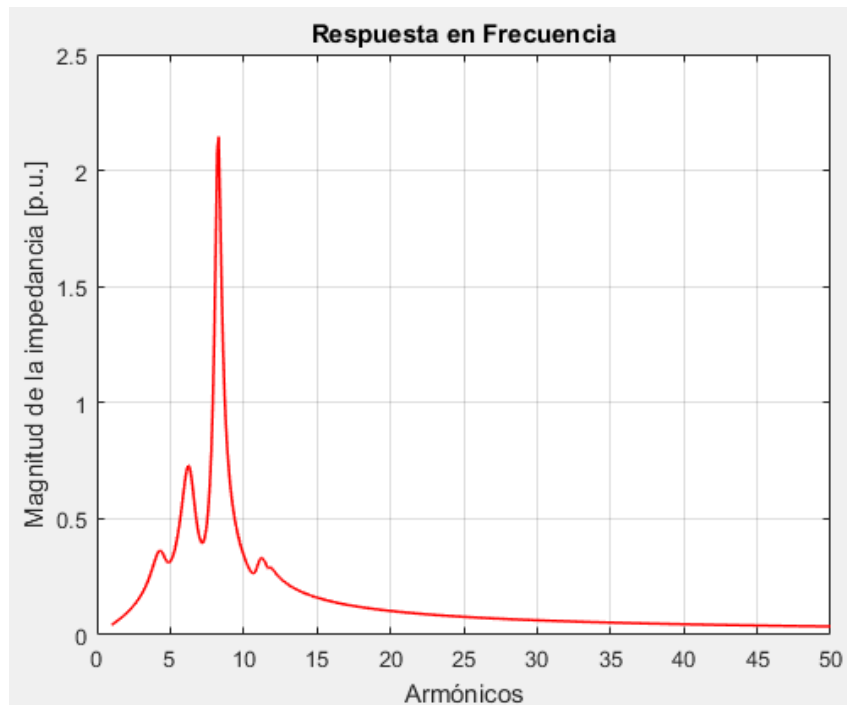


Figura 35. Respuesta en frecuencia nodo 9.

En las figuras (30), (31), (32), (33), (34) y (35), se observa la presencia de picos que son debido a resonancias paralelo, estas resonancias paralelo generan una elevación en la tensión. La resonancia paralelo es de mucho cuidado en los sistemas y más aún si se encuentran cerca de la fundamental, pero en el caso de este sistema son características propias del mismo sistema de estudio y al no ser inyectadas por la carga no lineal estas no presentar un riesgo para el mismo. En las figuras (30), (31) y (33) se observan picos de resonancia paralelo cerca de la componente fundamental, estas generan aumento en la tensión, las cuales se observan en el espectro de corrientes armónicas de la figura (16).

Estos inconvenientes se pueden corregir mediante la implementación de un filtro pasivo para eliminar cada armónica que aparece debido a estas cargas. En el siguiente punto se mostrará cómo se corrige esto cuando se implementan los filtros.

6.2- Resultados simulaciones para sistema de nueve nodos IEEE con la implementación del filtro

6.2.1- Flujo de potencia armónico

En la siguiente tabla se observan los valores que da el programa realizado en Matlab sobre flujo de potencia convencional, el cual convergió en 4 iteraciones.

Nodo	V [P.U.]	Angulo [°]	P_d [MW]	Q_d [MVar]	P_g [MW]	Q_g [MVar]
1	1,040	0	0	0	71,314	-31,324
2	1,025	8,861	0	0	163	-43,223
3	1,025	4,438	0	0	85	-63,618
4	1,058	-2,139	0	0	0	0
5	1,044	-3,866	125	50	0	0
6	1,063	-3,665	90	30	0	0
7	1,056	3,461	0	0	0	0
8	1,055	0,606	100	35	0	0
9	1,062	1,816	0	0	0	0

Tabla 13. . Resultados de los nodos del sistema con el filtro.

Con los datos obtenidos en la tabla 13 se procede a correr el programa de inyección de corrientes con el fin de verifica que la implementación del filtro logro reducir la distorsión armónica y mejoro los problemas de resonancia.

En la siguiente tabla se observa el valor de las corrientes, como se redujeron al implementar el filtro y como se redujo también la distorsión armónica total (THD).

Nodo	Fundamental		Armónico 5		Armónico 7	
	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]
1	1,04	38,34	0	26,63	0	101,03
2	1,025	66,63	0,0004	123,656	0,0003	-69,23
3	1,025	61,59	0,0006	106,68	0,0004	-83,4
4	1,058	83,24	0,0019	50,58	0,0015	121,69
5	1,044	82,12	0,002	-68,8	0,0001	98,33
6	1,063	75,32	0,0068	65,54	0,0032	122,35
7	1,056	67,16	0,0052	123,88	0,0043	-69,03
8	1,055	55,85	0,0097	122,89	0,0039	-68,29
9	1,062	62,12	0,0071	106,92	0,0056	-83,2

Nodo	Armónico 11		Armónico 13	
	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]
1	0	-43,37	0	98,56
2	0,0001	-146,27	0	106,66
3	0,0001	-34,08	0	104,43
4	0,0254	-26,62	0,0009	114,04
5	0,0058	-10,12	0,0012	-68,31
6	0,0071	161,27	0,0002	-61,21
7	0,0017	-146,11	0,0004	106,81
8	0,0018	103,59	0,0008	-78,18
9	0,0014	-33,92	0,0014	104,57

Tabla 14. Datos de corrientes armónicas en los nodos con el filtro.

Con los datos obtenidos en la tabla 14 se calcula tanto en THDV como el THDI con la implementación del filtro.

Nodo	THDV [%]	THDI [%]
1	0,01	0
2	0,18	0
3	0,14	0
4	2,88	0
5	4,12	18
6	1,66	0
7	2,37	0
8	4,16	55
9	1,75	0

Tabla 15. Datos de THDV y THDI con el filtro.

En la siguiente figura se observa claramente la disminución de estas tensiones debido a las corrientes, se observa que el armónico más cercano a la fundamental que es el quinto, presenta una reducción significativa respecto a antes de aplicar el filtro.

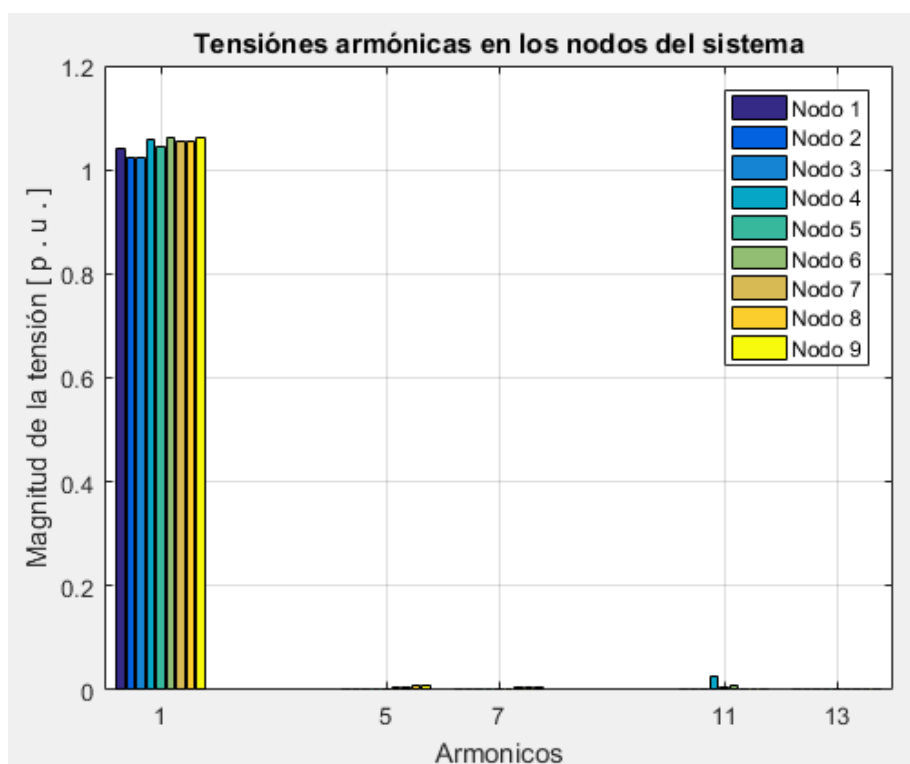


Figura 36. Tensiones armónicas con el filtro.

En las siguientes figuras se observa cómo se redujo la distorsión de la onda producto de las cargas no lineales conectadas al sistema.

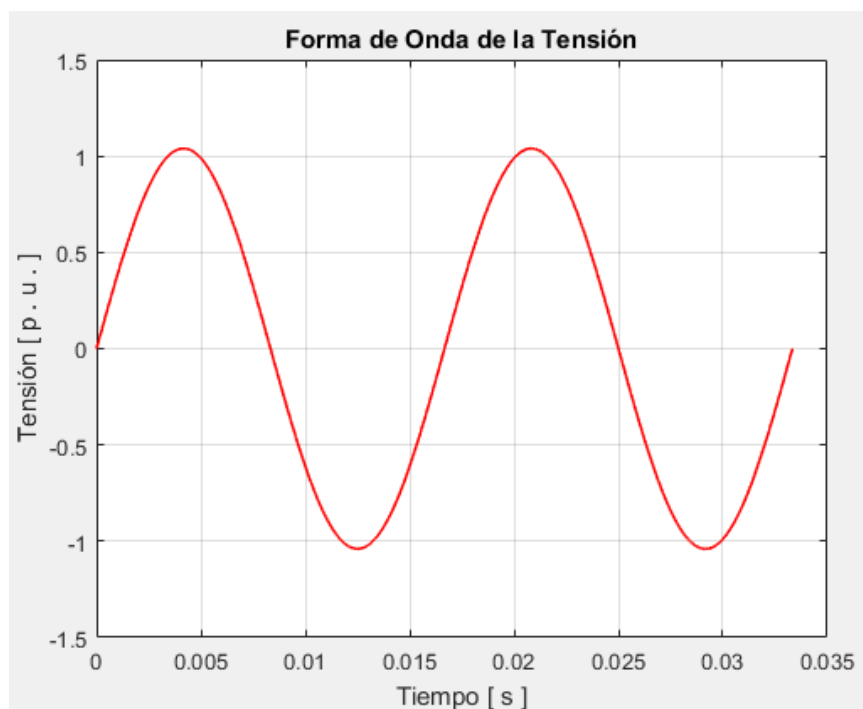


Figura 37. Forma de onda nodo 1 con filtro.

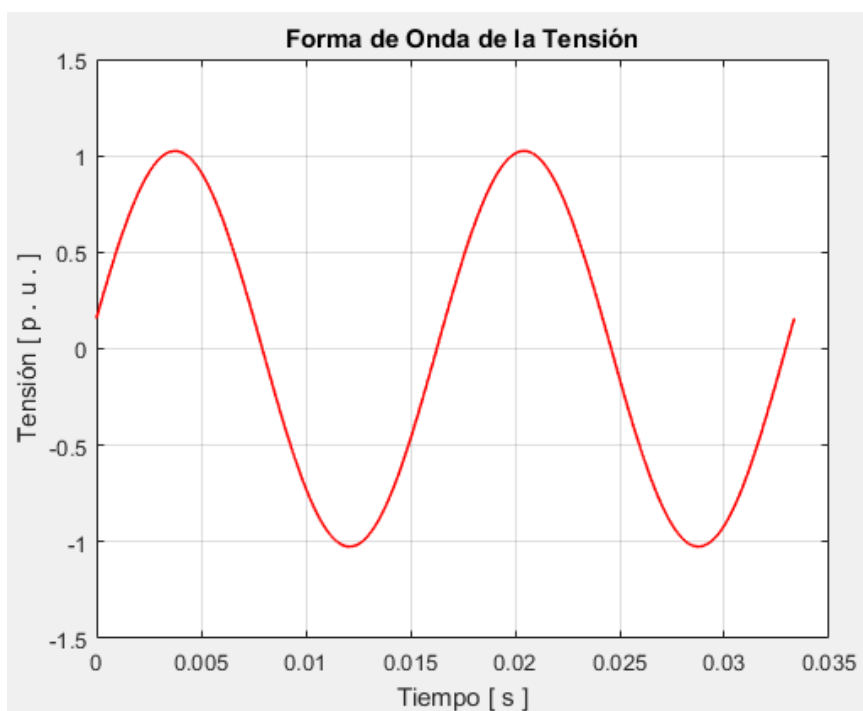


Figura 38. Forma de onda nodo 2 con filtro

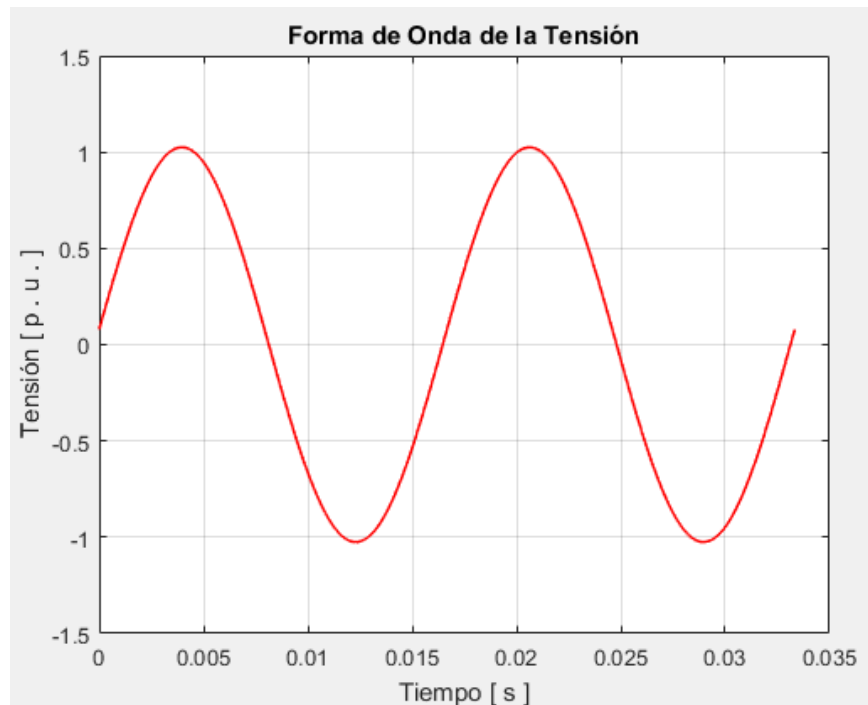


Figura 39. Forma de onda nodo 3 con filtro.

En las figuras anteriores no se hace muy evidente algún cambio en la forma de la onda debido a que estas no se veían muy afectados por las cargas no lineales, por lo tanto, estas formas son casi iguales a las anteriores sin el filtro.

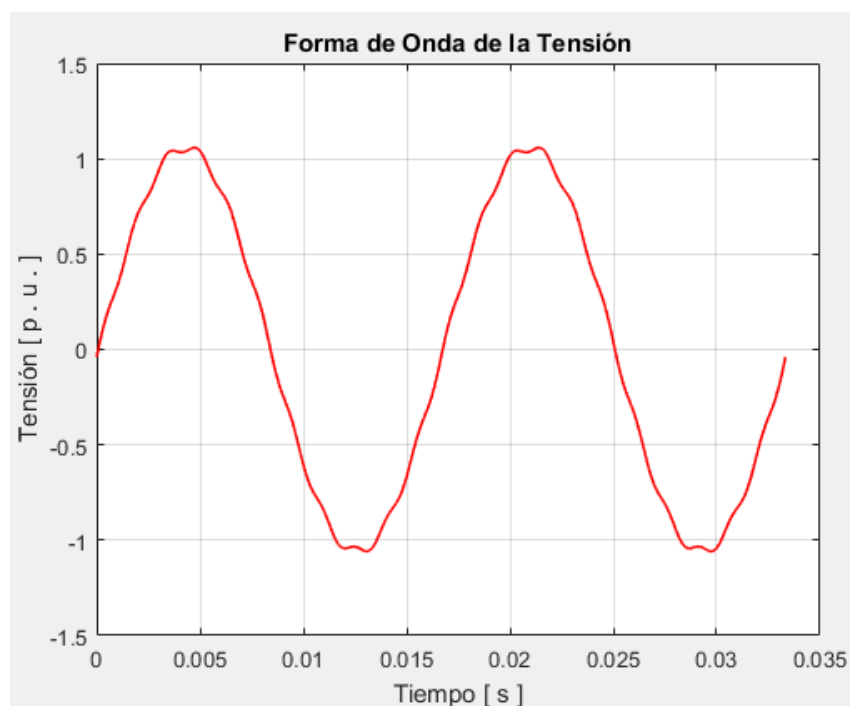


Figura 40. Forma de onda nodo 4 con filtro

En el nodo 4, figura (40), se observa una reducción de la distorsión armónica en la onda al implementar el filtro, con un THDV de 2,88% y sus magnitudes de corrientes armónicas de 0,0019; 0,0015; 0,0254 y 0,0009 en PU para 5°, 7°, 11° y 13° armónica respectivamente, evidenciando que al implementar el filtro este logro cumplir su objetivo de llevar los niveles de THDV a los establecidos por el estándar, estos valores se pueden observar para los demás nodos del sistema en la tabla 36.

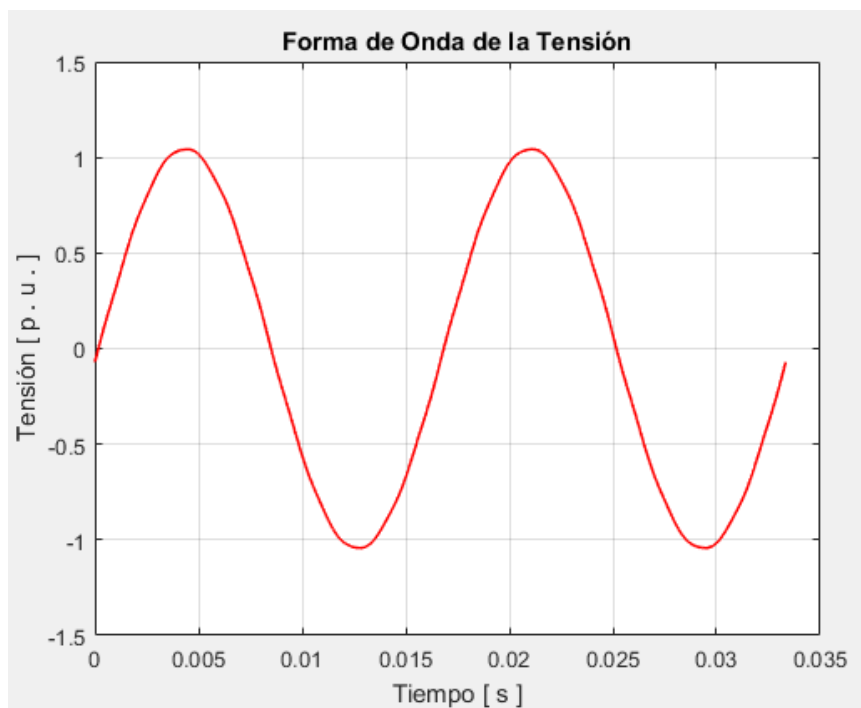


Figura 41. Forma de onda nodo 5 con filtro.

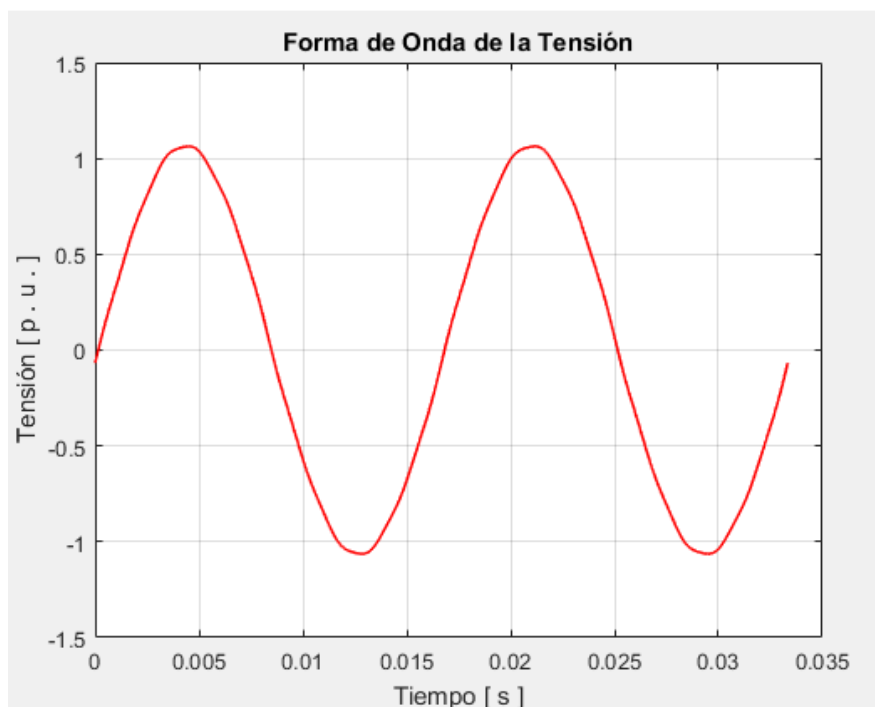


Figura 42. Forma de onda nodo 6 con filtro.

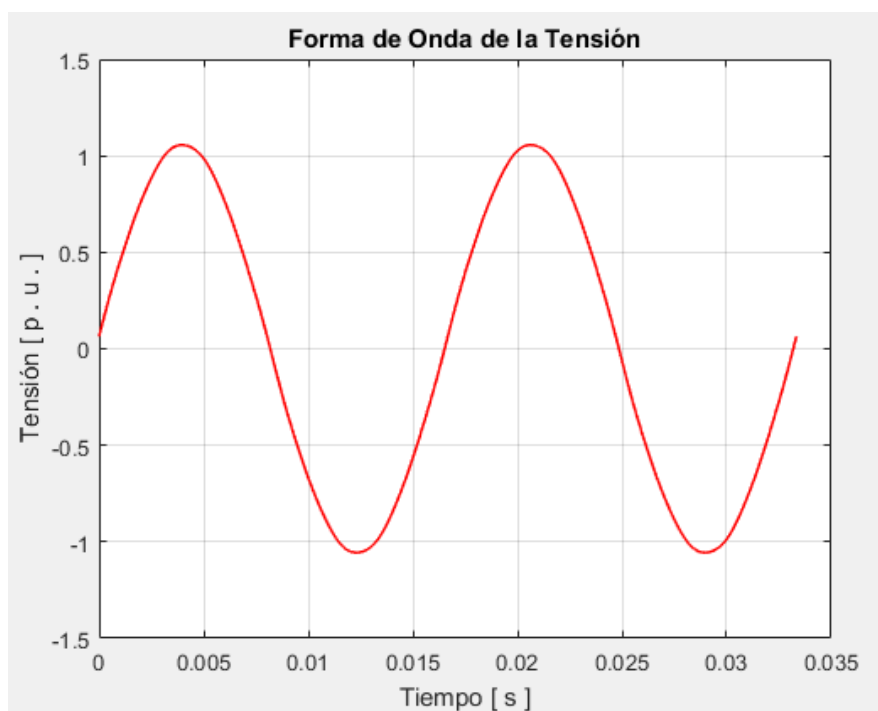


Figura 43. Forma de onda nodo 7 con filtro.

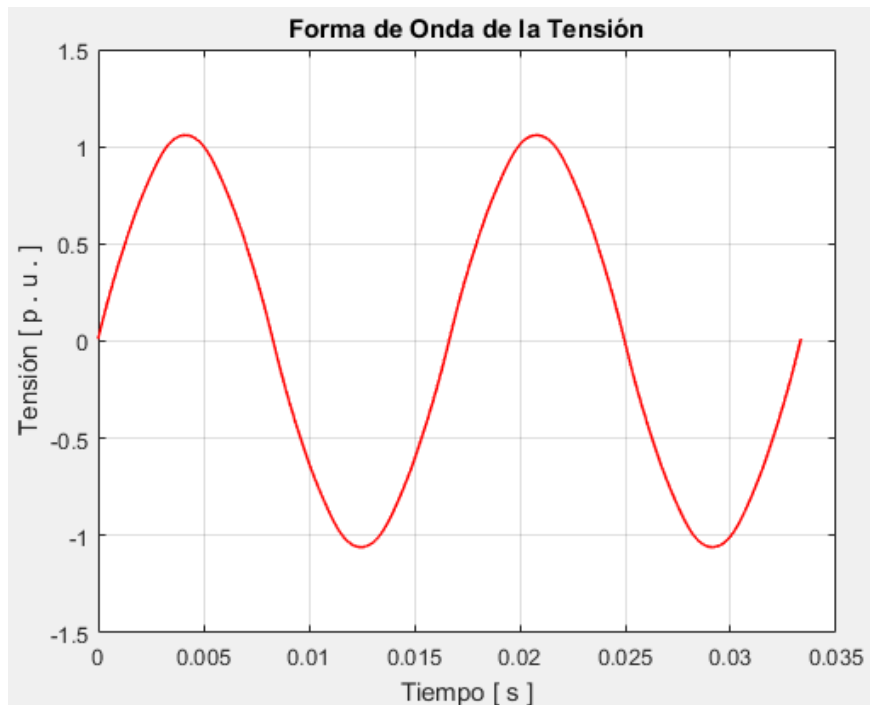


Figura 44. Forma de onda nodo 8 con filtro.

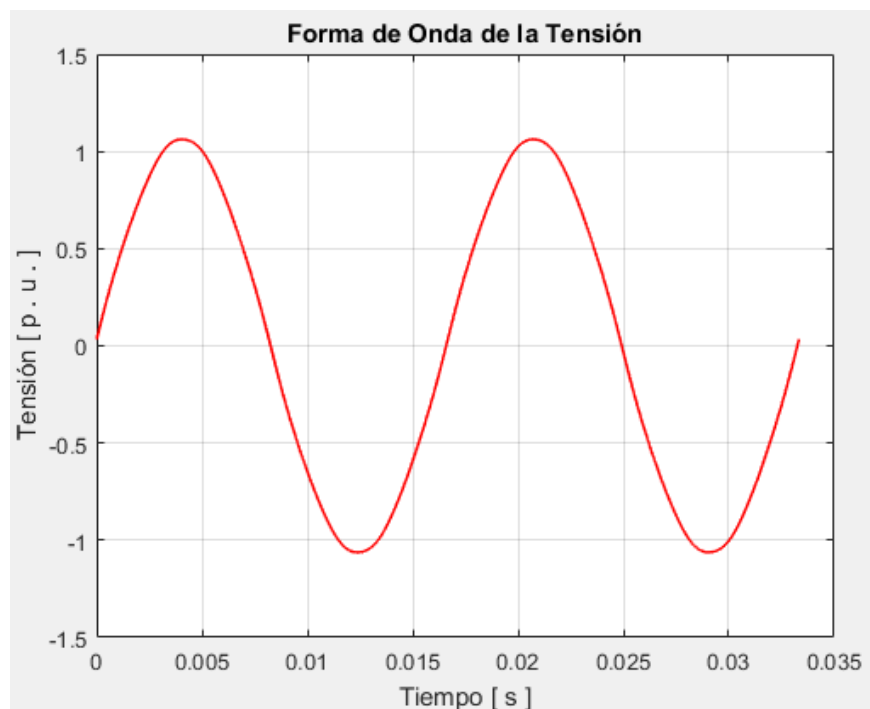


Figura 45. Forma de onda nodo 9 con filtro.

En las figuras (41), (42), (43), (44) y (45), se observa claramente una reducción en la distorsión de la onda, los picos que existían ya no se ven, se suavizó la onda a tal punto de ser casi la onda sinusoidal pura, en la figura (39) se observa un poco de distorsión y es debido a que estas cargas armónicas, a pesar de ser

filtradas, estas se reflejan en el lugar donde se conecta el filtro y en este caso el filtro se conectó en el lugar donde están las cargas armónicas, nodo cinco y nodo ocho.

6.2.2- Barrido en frecuencia con la implementación del filtro

Este método se corre con el fin de verificar el estado de resonancia del sistema, que nodos presentan resonancias en paralelo y cuales en serie. Para eso se corre el programa desarrollado en el software Matlab, empezando por la frecuencia fundamental hasta llegar al armónico 50 (3000Hz), pero esta vez ya tiene el filtro conectado, buscando reducir los picos de resonancia y evitar que estén cerca del fundamental.

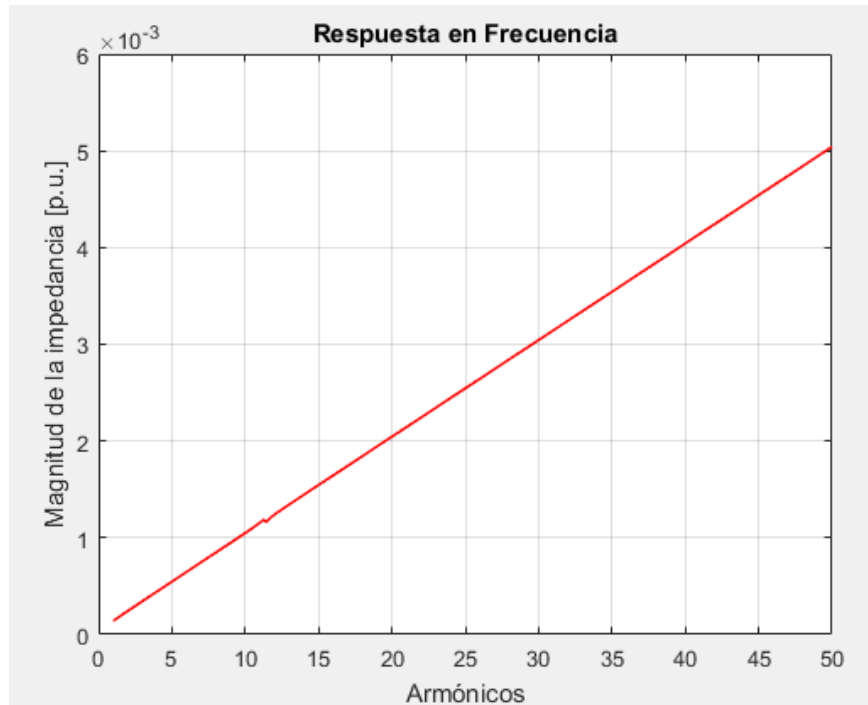


Figura 46. Respuesta en frecuencia nodo 1 con filtro.

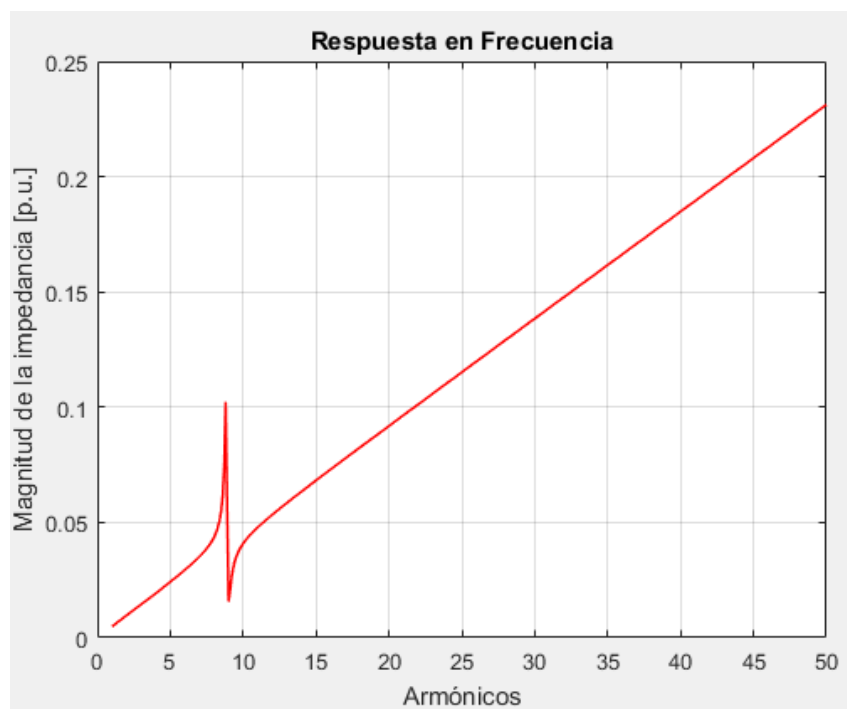


Figura 47. Respuesta en frecuencia nodo 2 con filtro.

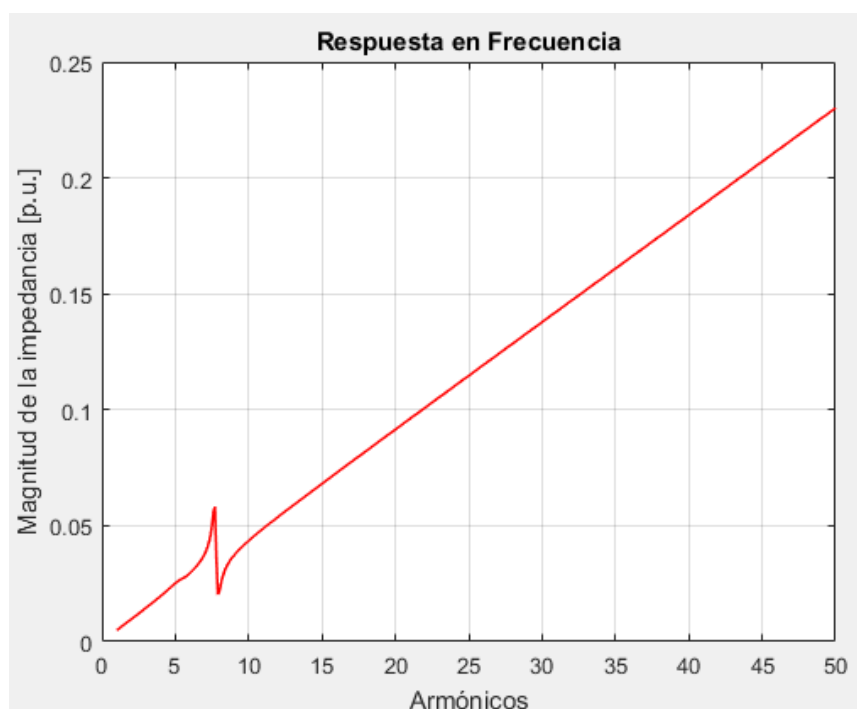


Figura 48. Respuesta en frecuencia nodo 3 con filtro.

En las figuras anteriores se observa un pico en el armónico siete debido a la implementación del filtro, ya que este está compuesto en parte por capacitores no solo para cumplir la función de filtrado sino también

con el fin de mejorar el factor de potencia y por este motivo se incrementa ese pico, pero el cual no afecta realmente al sistema por no ser debido a las corrientes armónicas.

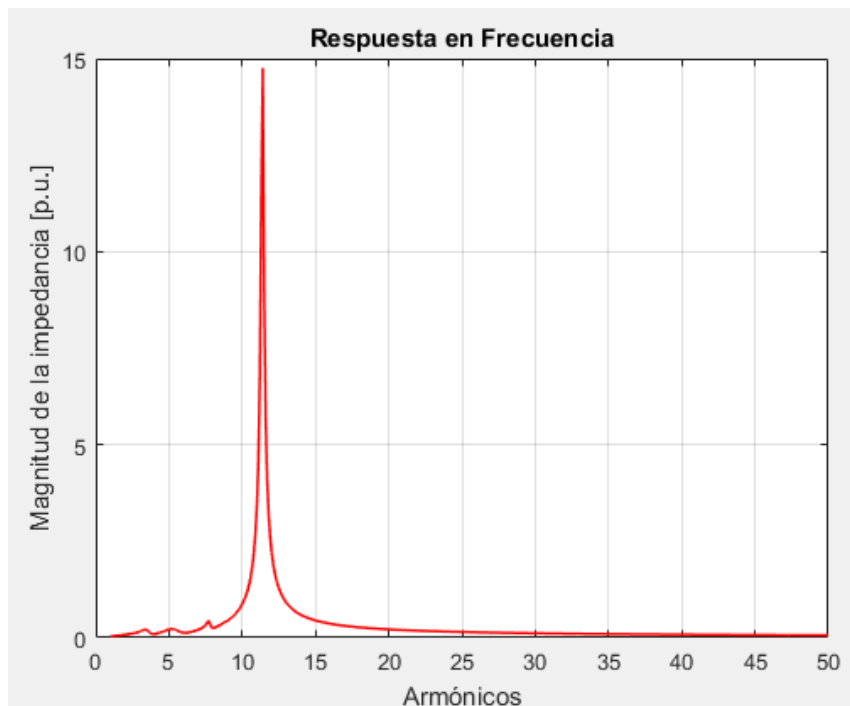


Figura 49. Respuesta en frecuencia nodo 4 con filtro.

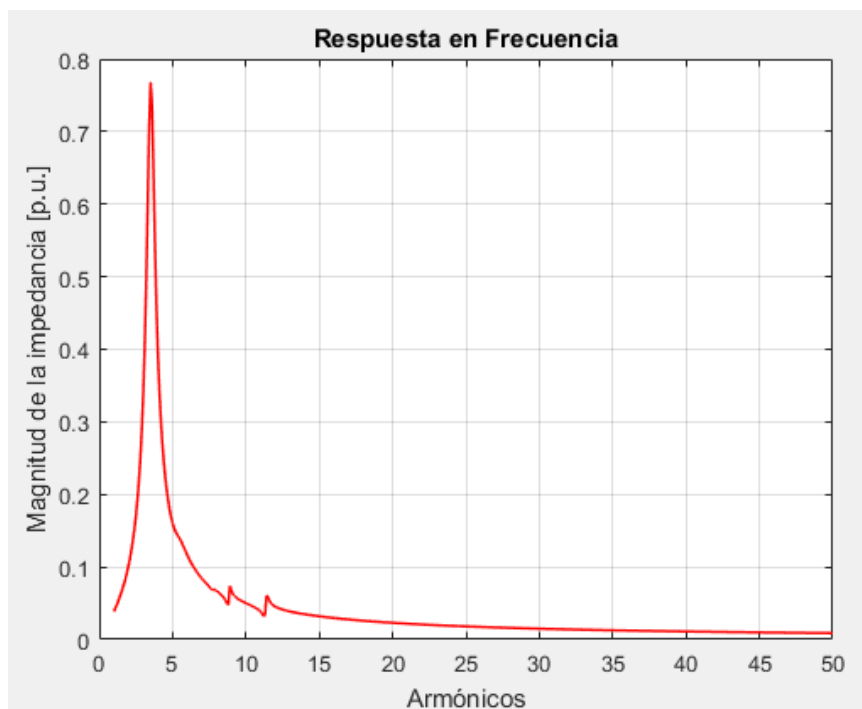


Figura 50. Respuesta en frecuencia nodo 5 con filtro.

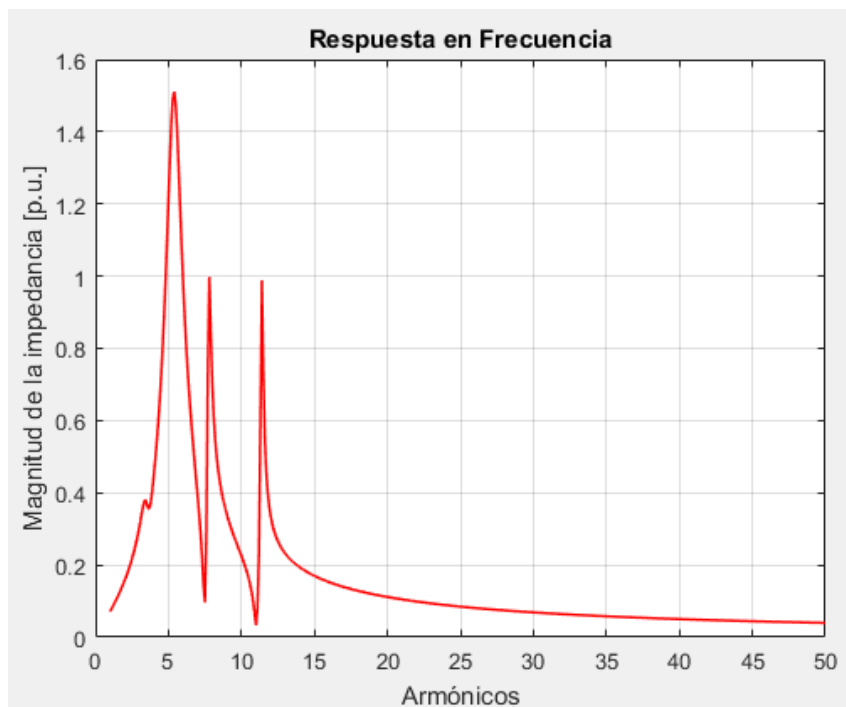


Figura 51. Respuesta en frecuencia nodo 6 con filtro.

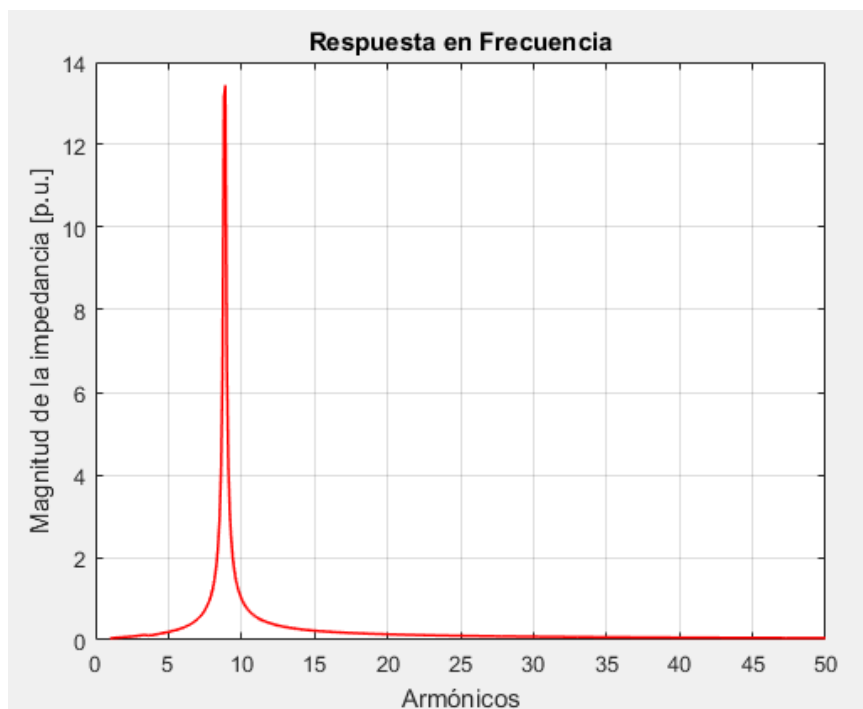


Figura 52. Respuesta en frecuencia nodo 7 con filtro.

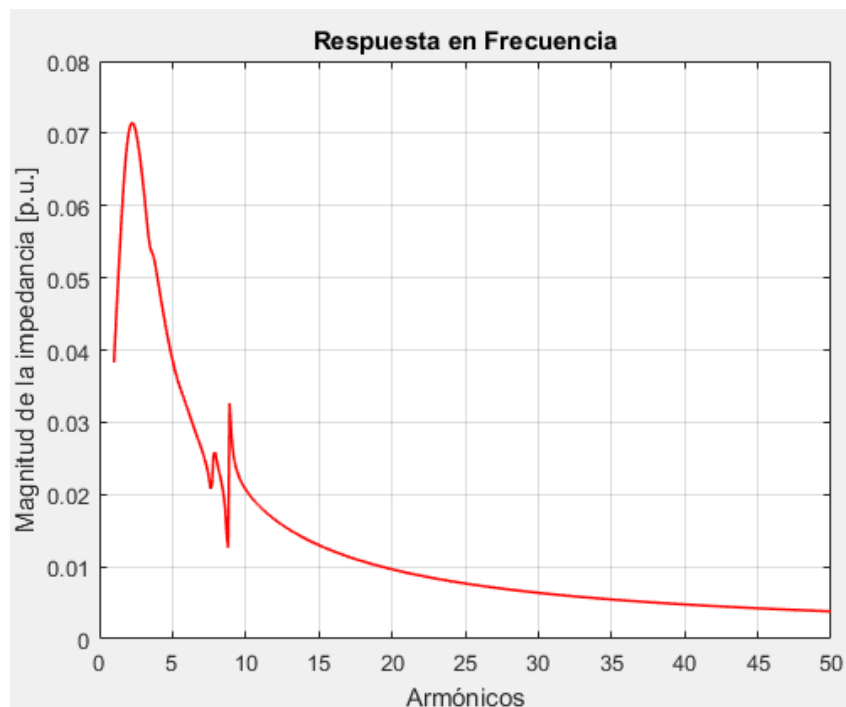


Figura 53. Respuesta en frecuencia nodo 8 con filtro.

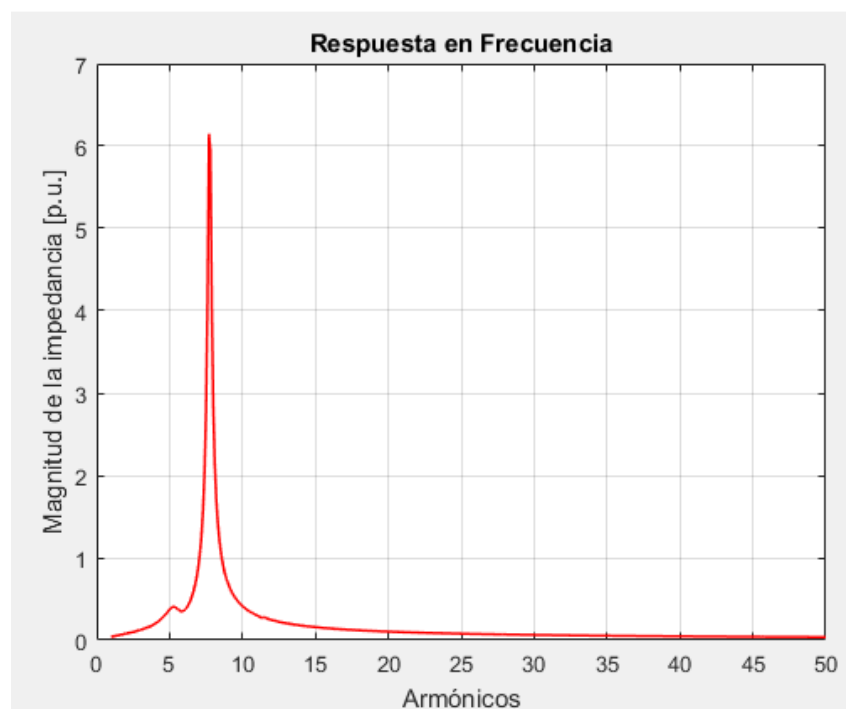


Figura 54. Respuesta en frecuencia nodo 9 con filtro.

En las figuras (49), (50), (51), (52) y (53) se hace evidente la reducción de picos, los cuales son sinónimo de resonancia paralela, se ve como estos se redujeron y se alejaron de la fundamental, también se observa que algunos se suavizaron lo representa una disminución en los picos de tensión, se ve claramente que el filtro cumple su función de filtrar dichas corrientes y evitar la resonancia entre estos elementos.

6.2.3- Parámetros para el diseño del filtro

Con los resultados obtenidos por medio de los programas implementados en Matlab, se diseña el filtro que se conectara en los nodos donde aparecen las corrientes armónicas, con el fin de lograr la disminución de las mismas y obtener el sistema un THDV dentro de los estándares de la IEEE 519-1992 [13]. El arreglo del banco de capacitores trifásico se conformará de la siguiente manera:

Para el filtro ubicado en el nodo 5:

Se deben compensar 10,11 MVar, para estos se deben disponer de diez grupos en serie para cada una de las fases y cada uno de estos grupos compuesto por cinco capacitores en paralelo, cada uno con 700 KVar (3,5 MVar). Cada grupo estará expuesto a una tensión de 23KV con un total de 230 KV fase-neutro por todos los grupos.

Para el filtro ubicado en el nodo 8:

Se deben compensar 8,1 MVar, para estos se deben disponer diez grupos en serie para cada una de las fases y cada uno de los grupos está compuesto por nueve capacitores en paralelo cada uno con 300 KVar (2,7 MVar). Cada grupo estará expuesto a una tensión de 23 KV con un total de 230 KV fase-neutro por todos los grupos.

En la tabla 12 se puede observar la reducción del THDV, logrando con esto establecer el sistema dentro de los límites permitidos por el estándar, corrigiendo así el problema generado por la distorsión armónica debido a las cargas no lineales presentes este.

6.3- Resultados simulaciones para sistema de prueba IEEE ocho nodos

6.3.1- Flujo de potencia armónico

En la siguiente tabla se observan los valores que da el programa realizado en Matlab sobre flujo de potencia convencional, el cual convergió en tres iteraciones.

Nodo	V [P.U.]	Angulo [°]	P_d [MW]	Q_d [MVar]	P_g [MW]	Q_g [MVar]
1	1	0	0	0	4,027	3,33
2	0,936	0,66	0,675	0,327	0	0
3	0,903	1,187	0	0	0	0
4	0,929	0,715	0	0	0	0
5	0,902	1,193	0	0	0	0
6	0,887	1,472	2,1	2,142	0	0
7	0,927	0,730	0,6	0,45	0	0
8	0,901	1,206	0,2	0,15	0	0

Tabla 16. Resultados de los nodos del sistema.

Con los resultados obtenidos en la tabla 16 se procede a emplear el método de inyección de corrientes para ver la distorsión armónica y los valores en magnitud y ángulo de las corrientes armónicas.

En la siguiente tabla se puede observar el valor de las corrientes armónicas producidas a partir de estas cargas no lineales en cada uno de los nodos en magnitud y ángulo.

Nodo	Fundamental		Armónico 5		Armónico 7	
	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]
1	1	64,92	0,057	-136,29	0,0366	36,9
2	0,936	64,92	0,057	-136,29	0,0366	36,9
3	0,903	73,09	0,02	-138,17	0,0125	33,38
4	0,929	73,91	0,1862	-122,26	0,1333	55,85
5	0,902	78,15	0,0176	-139,48	0,0108	31,18
6	0,887	119,32	0,0043	-142,96	0,0025	20,82
7	0,927	76,14	0,2212	-121,31	0,1596	56,98
8	0,901	94,58	0,0127	-143,62	0,0076	23,89

Nodo	Armónico 11		Armónico 13	
	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]
1	0,1608	140,15	0,0445	66,76
2	0,1608	140,15	0,0445	66,76
3	0,0526	135,86	0,0143	62,57
4	0,1006	-157,21	0,0729	59,42
5	0,0444	133,02	0,0120	59,69
6	0,0087	116,58	0,0022	42,18
7	0,1143	-137,74	0,0806	58,34
8	0,0287	122,55	0,0075	48,59

Tabla 17. Datos de corrientes armónicas en los nodos.

Con los datos de la tabla 17 se calcula tanto el THDI como el THDV para cada nodo, los cuales se observan en la siguiente tabla:

Nodo	THDV [%]	THDI [%]
1	37,78	0
2	40,36	18
3	13,5	0
4	46,98	0
5	11,62	0
6	2,23	0
7	50,71	55
8	8,23	0

Tabla 18. Datos del THDV y THDI.

En la siguiente grafica se puede observar las tensiones fundamentales y las inyectadas por las cargas armónicas en su respectivo armónico en cada nodo.

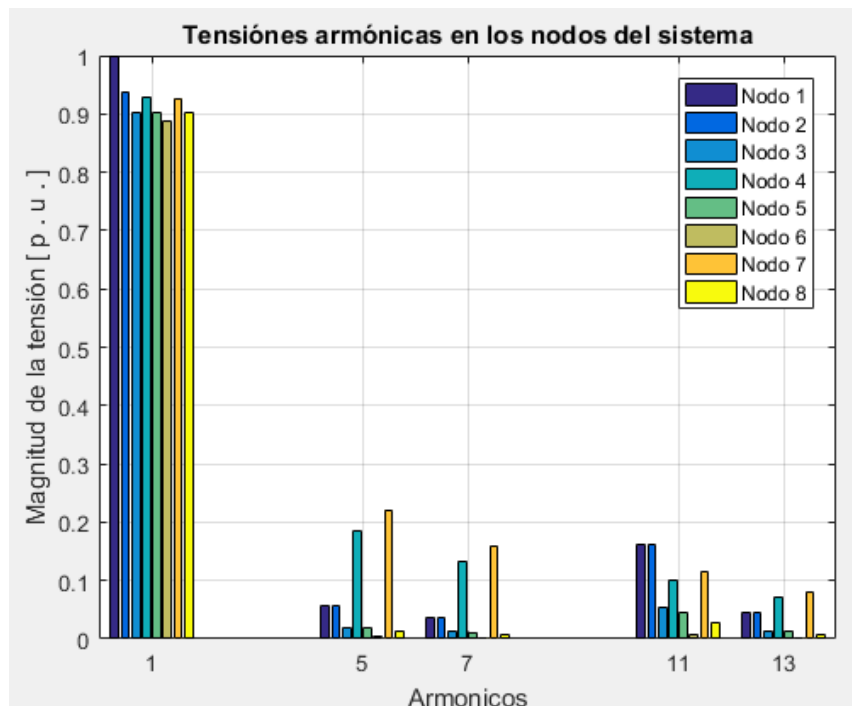


Figura 55. Tensiones armónicas.

En la gráfica (55), se puede observar como las cargas no lineales generan picos de tensión para cada uno de los armónicos analizados, se observa que el armónico más cercano al fundamental que en este caso es el quinto, se hace evidente un aumento de la tensión en esos nodos, generando inconvenientes y distorsionando la onda como se observa en las siguientes figuras:

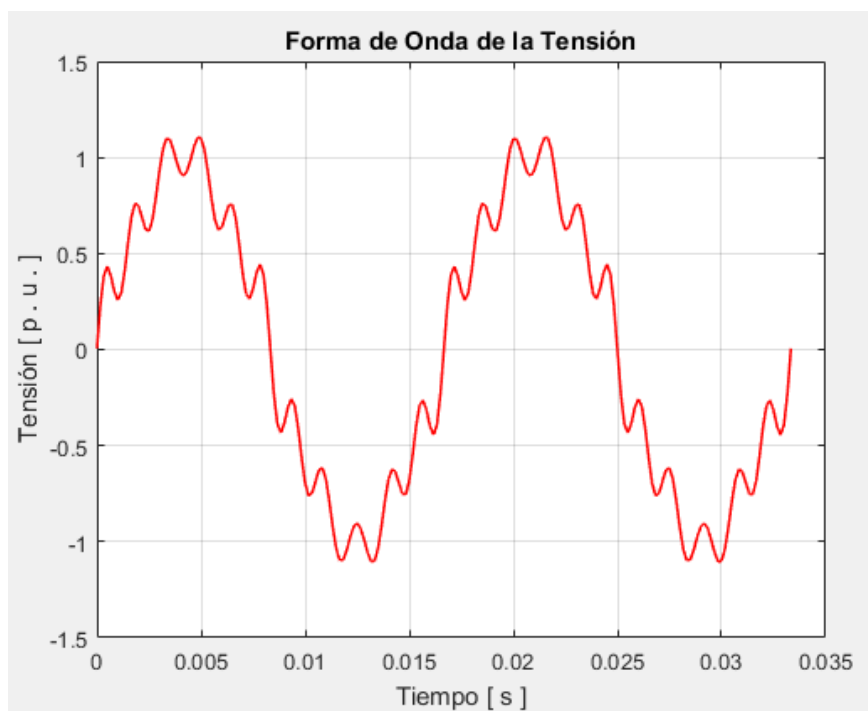


Figura 56. Forma de onda nodo 1.

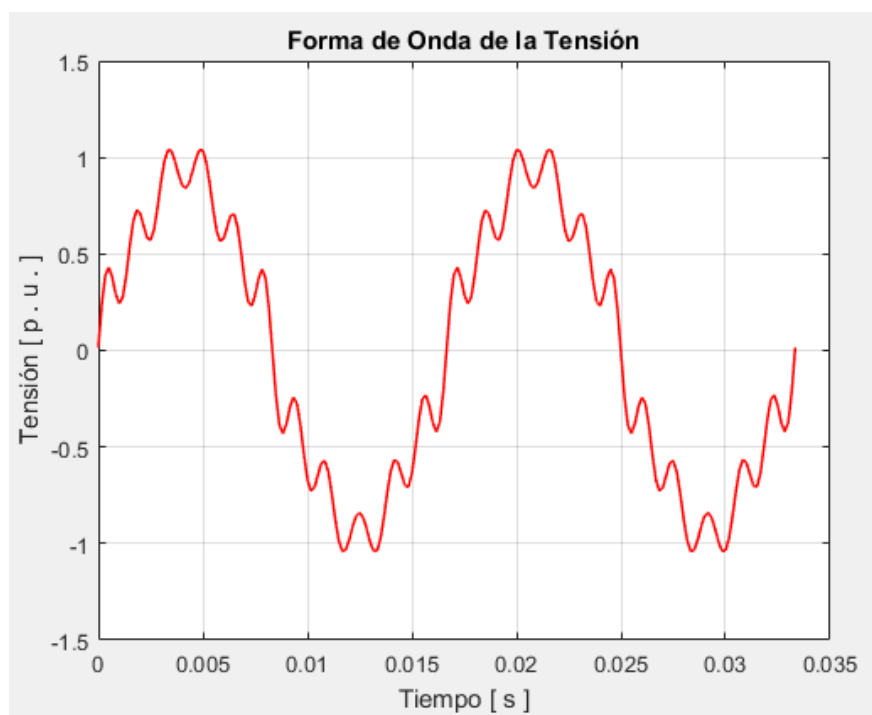


Figura 57. Forma de onda nodo 2.

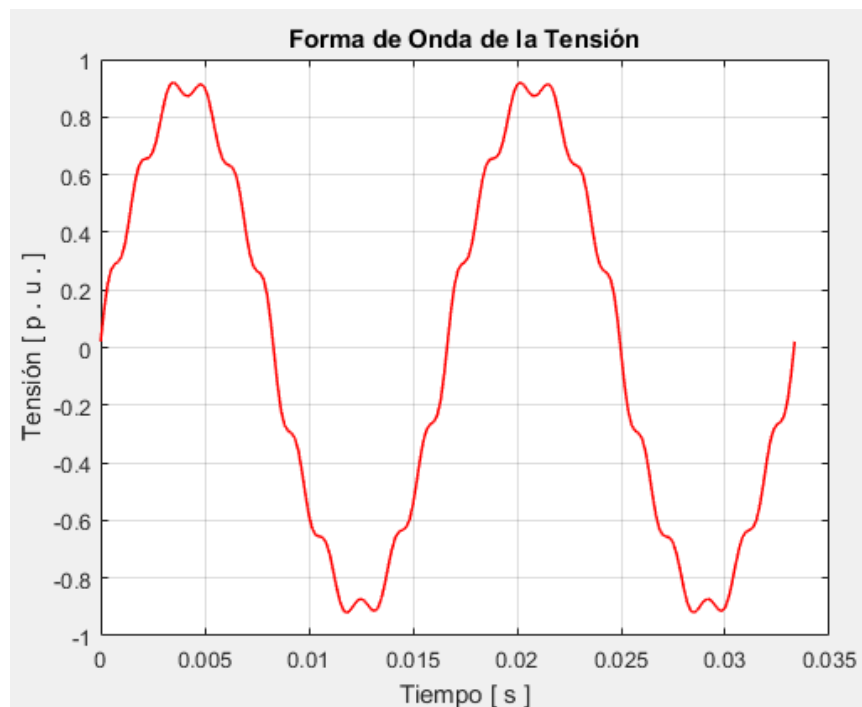


Figura 58. Forma de onda nodo 3

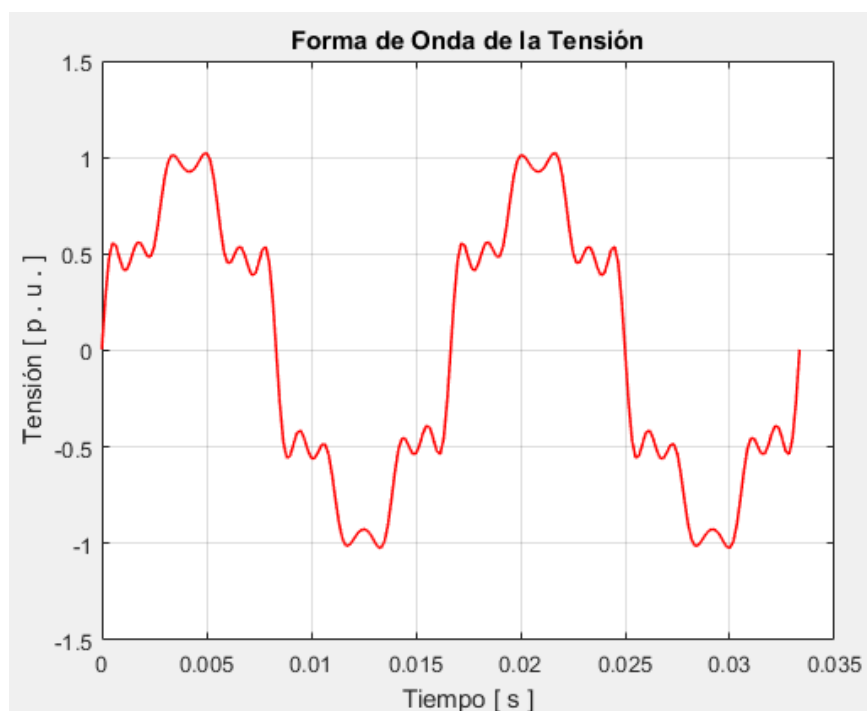


Figura 59. Forma de onda nodo 4.

En el nodo 4, figura (59), se observa una distorsión de la onda con un THDV de 46,98%, con sus magnitudes de corrientes armónicas de 0,1862; 0,1333; 0,1006 y 0,0729 todas en PU para 5°, 7°, 11° y 13° armónicos respectivamente, dando como resultado un pésimo THDV muy por encima a lo establecido por el estándar. Los demás nodos que presentan estas distorsiones se puede ver en la tabla 18.

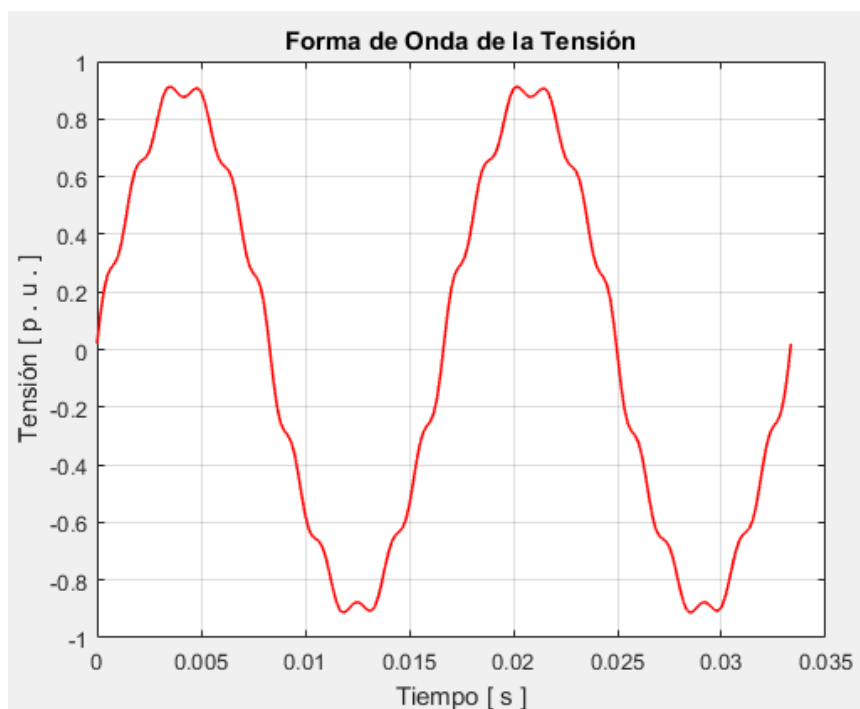


Figura 60. Forma de onda nodo 5.



Figura 61. Forma de onda nodo 6.

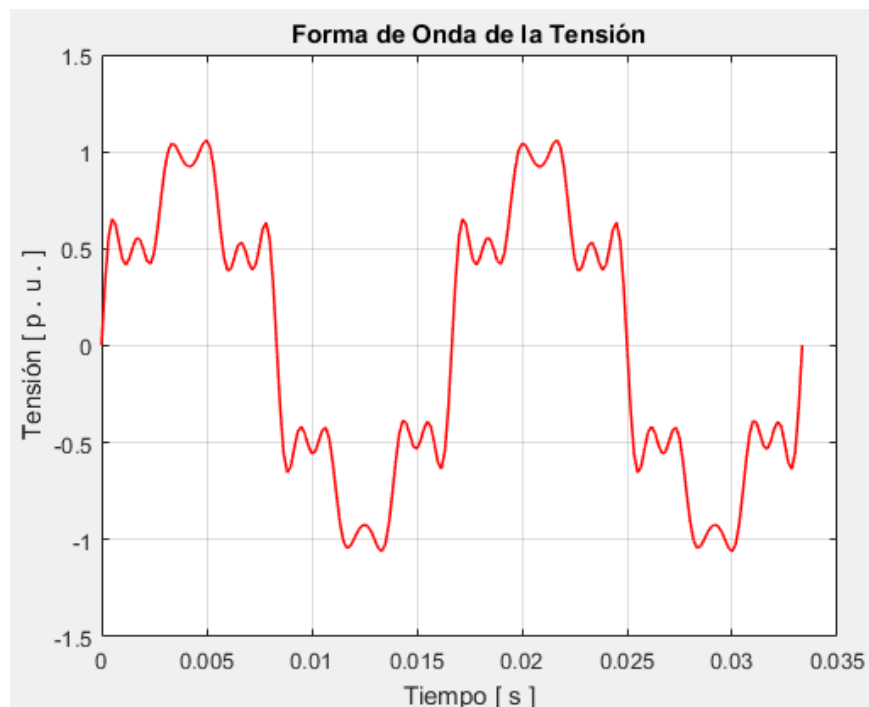


Figura 62. Forma de onda nodo 7.

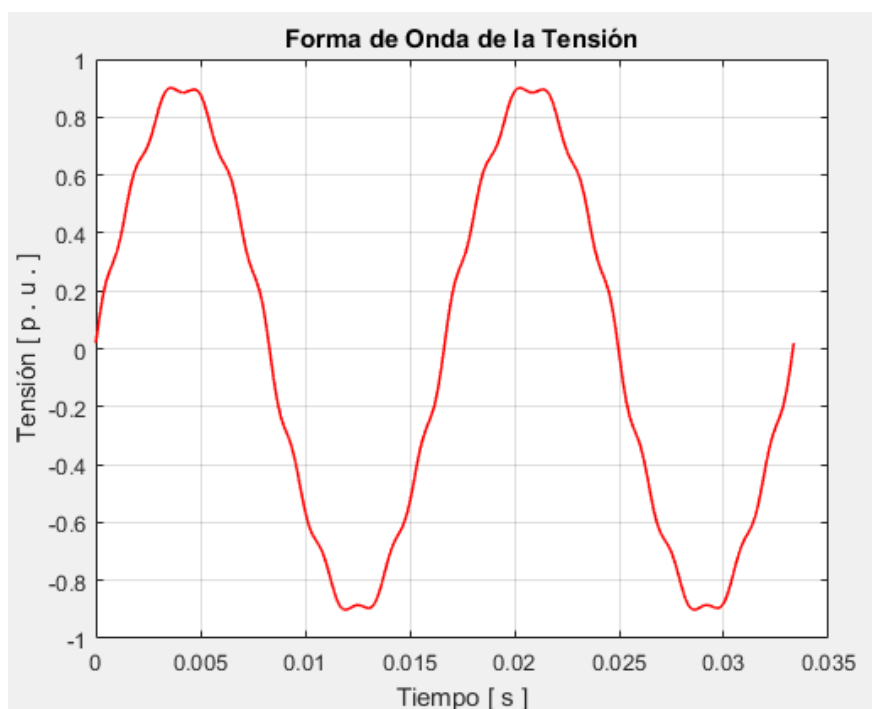


Figura 63. Forma de onda nodo 8

En las figuras (56), (57), (59) y (62) es evidente la distorsión de la onda debido a las cargas no lineales conectadas en esos nodos, en este caso es un compensador estático (TCR) para el nodo 7 y una fundidora para el nodo 2, estos no solo distorsionan la onda del nodo al cual se encuentra conectados, sino también

la de los nodos cercanos, como se puede observar en las figuras (57) y (62). Estos dos nodos son los que más se ven afectados por estas corrientes armónicas.

6.3.2- Barrido en frecuencia

Este método se corre con el fin de verificar el estado de resonancia del sistema, que nodos presentan resonancias en paralelo y cuales en serie. Para eso se corre el programa desarrollado en el software Matlab, empezando por la frecuencia fundamental hasta llegar al armónico 50 (3000Hz).

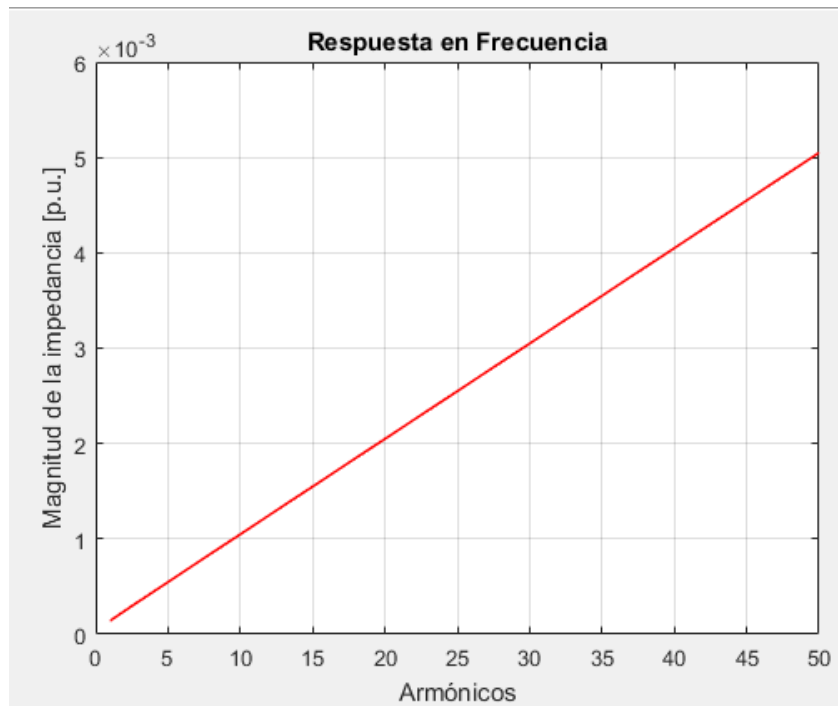


Figura 64. Respuesta en frecuencia nodo 1.

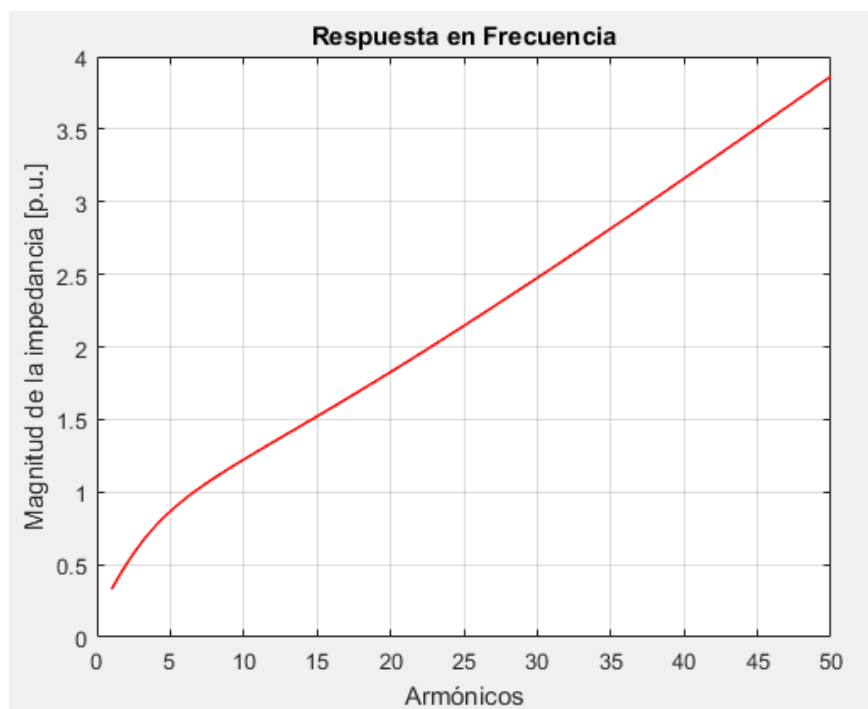


Figura 65. Respuesta en frecuencia nodo 2.

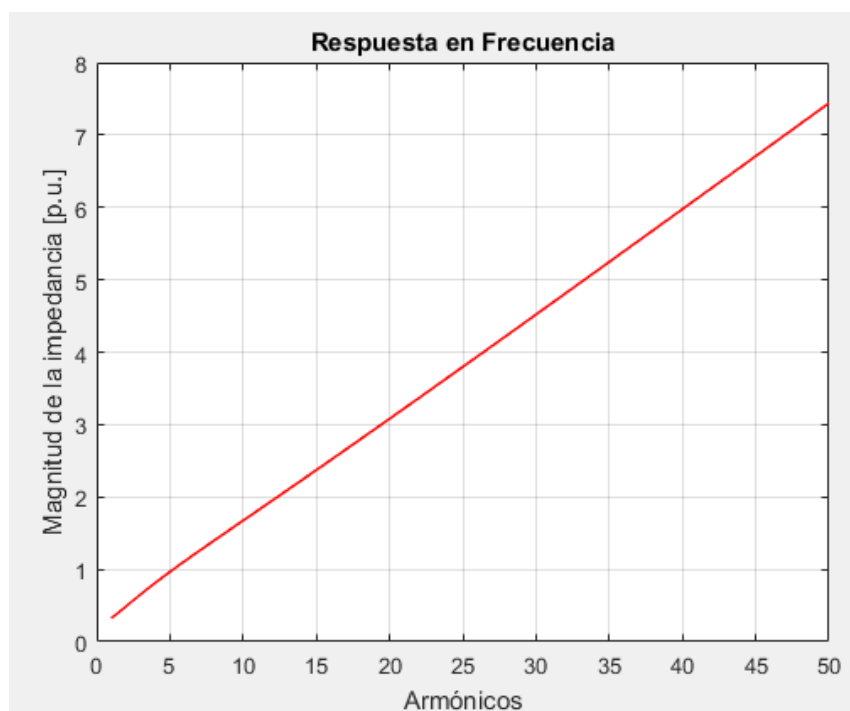


Figura 66. Respuesta en frecuencia nodo 3.

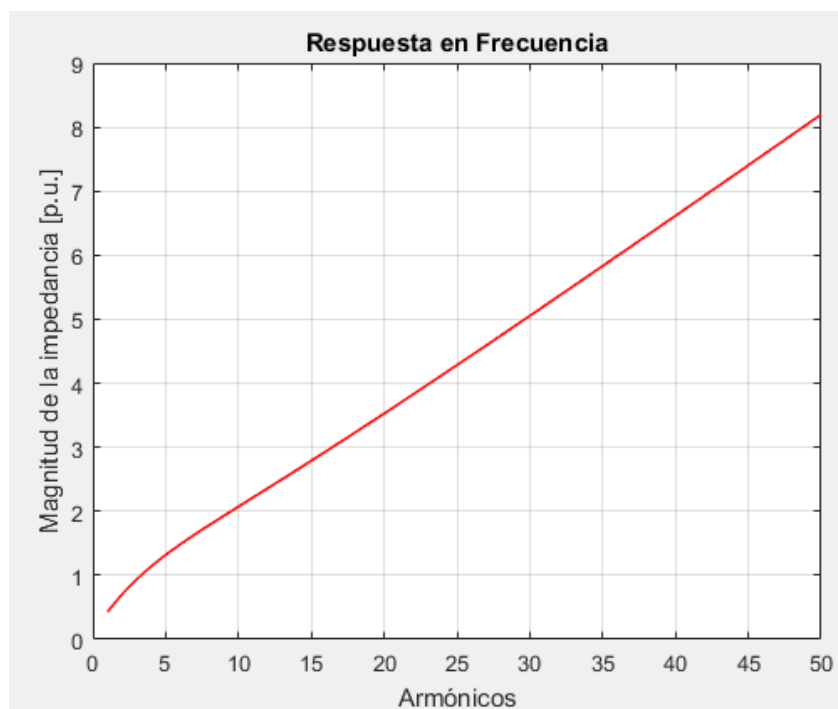


Figura 67. Respuesta en frecuencia nodo 4.

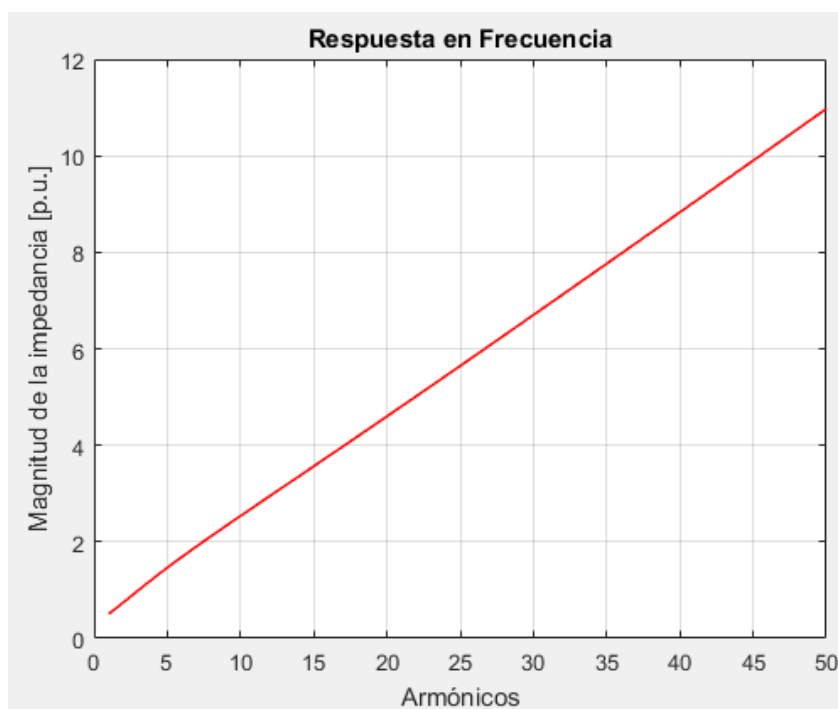


Figura 68. Respuesta en frecuencia nodo 5.

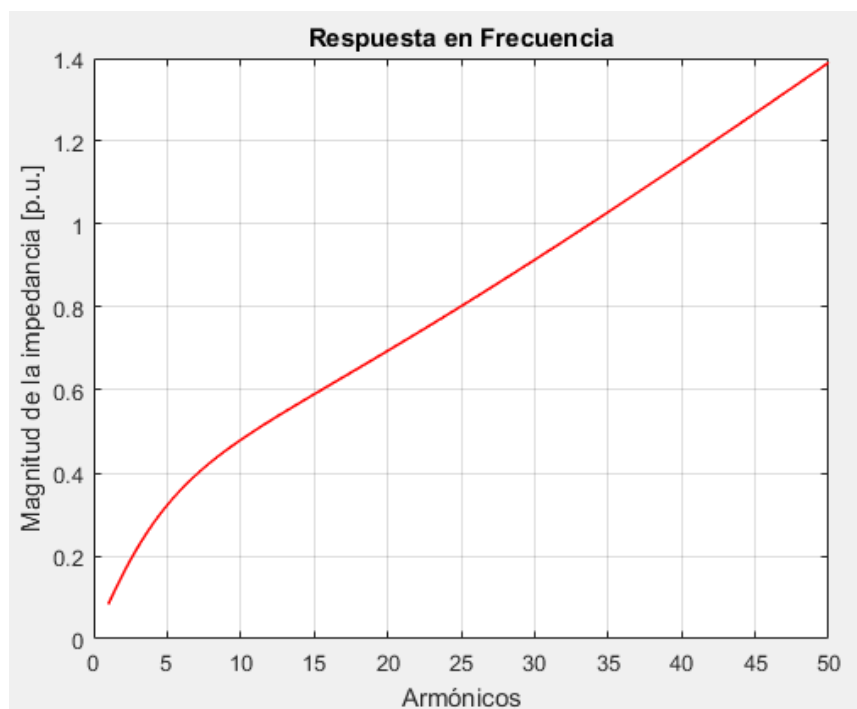


Figura 69. Respuesta en frecuencia nodo 6.

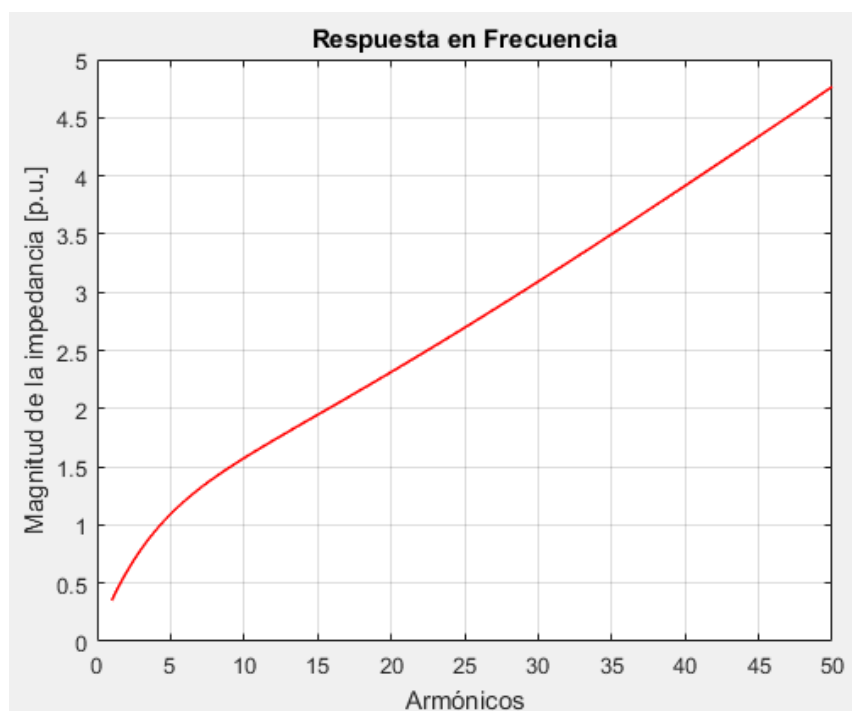


Figura 70. Respuesta en frecuencia nodo 7.

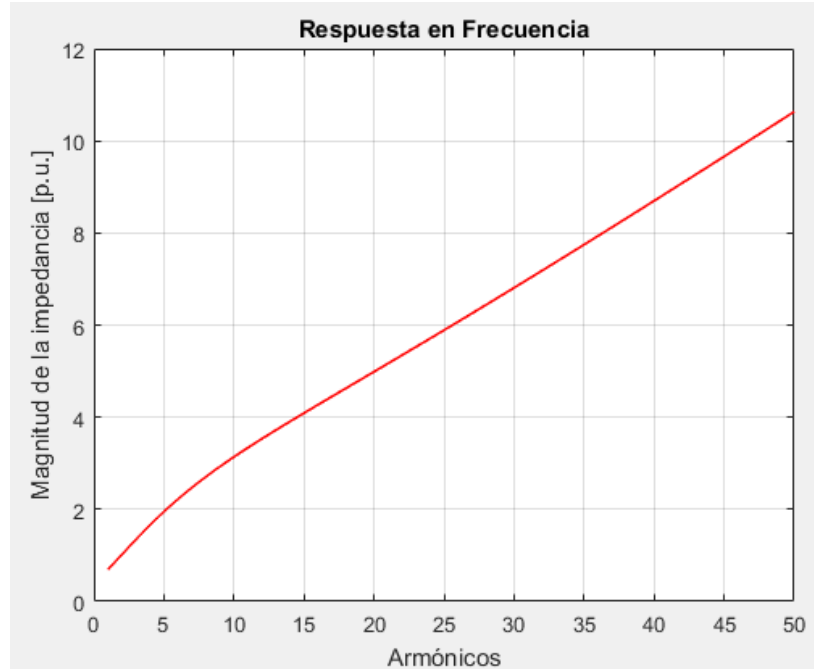


Figura 71. Respuesta en frecuencia nodo 8.

En estas graficas no se observan picos ni valles pronunciados, esto se debe a que el sistema no presenta resonancias entre sus elementos, ya que no posee elementos en derivación, no tiene capacitores para compensar reactivos ni filtros conectados, por eso se hace evidente en las gráficas la ausencia de estos inconvenientes.

6.4- Resultados simulaciones para sistema de ocho nodos IEEE con filtro

6.4.1- Flujo de potencia armónico

En la siguiente tabla se observan los valores que da el programa realizado en Matlab sobre flujo de potencia convencional, el cual convergió en 3 iteraciones.

Nodo	V [P.U.]	Angulo [°]	P_d [MW]	Q_d [MVar]	P_g [MW]	Q_g [MVar]
1	1	0	0	0	4,027	3,33
2	0,936	0,66	0,675	0,327	0	0
3	0,903	1,187	0	0	0	0
4	0,929	0,715	0	0	0	0
5	0,902	1,193	0	0	0	0
6	0,887	1,472	2,1	2,142	0	0
7	0,927	0,730	0,6	0,45	0	0
8	0,901	1,206	0,2	0,15	0	0

Tabla 19. Resultados de los nodos del sistema con el filtro.

Con los resultados obtenidos en la tabla 19 se procede a emplear el método de inyección de corrientes para ver la distorsión armónica y los valores en magnitud y ángulo de las corrientes armónicas.

En la siguiente tabla se puede observar el valor de las corrientes armónicas producidas a partir de estas cargas no lineales en cada uno de los nodos en magnitud y ángulo.

Nodo	Fundamental		Armónico 5		Armónico 7	
	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]
1	1	82,94	0	-61,26	0	108,4
2	0,936	82,94	0	-61,26	0	108,4
3	0,903	91,11	0	-63,14	0	104,88
4	0,929	76,77	0,0001	90,05	0,0001	-89,78
5	0,902	96,17	0	-64,45	0	102,68
6	0,887	137,34	0	-67,93	0	92,32
7	0,927	-85,17	0,0002	90,46	0,0001	-89,68
8	0,901	112,6	0	-68,58	0	95,39

Nodo	Armónico 11		Armónico 13	
	Tensión	Ángulo[°]	Tensión	Ángulo[°]
1	0,006	-13,15	0,001	-68,6
2	0,006	-13,15	0,001	-68,6
3	0,002	-17,43	0,0003	-72,79
4	0,0013	-11,98	0,0003	-69,66
5	0,0017	-20,27	0,0003	-75,67
6	0,0003	-36,71	0	-93,19
7	0	90,85	0	-89,92
8	0,0011	-30,74	0,0002	-86,77

Tabla 20. Datos de corrientes armónicas en los nodos con el filtro.

Con los datos obtenidos en la tabla 20 se calcula tanto en THDV como el THDI con la implementación del filtro.

Nodo	THDV [%]	THDI [%]
1	4,56	0
2	4,87	18
3	1,62	0
4	0,69	0
5	1,4	0
6	0,26	0
7	0,45	55
8	1,01	0

Tabla 21. Datos de THDV y THDI con el filtro.

En la figura (72), se observa una reducción notable en las tensiones armónicas que se veían en la figura (55). Para lograr reducir estos armónicos no solo se instalaron filtro en los mismos nodos donde se

encontraban las cargas no lineales, sino también fue necesario en el nodo 4, ya que este presentaba gran contenido armónico debido a la conexión del sistema, ya que este se encontraba cerca de ambas cargas no lineales.

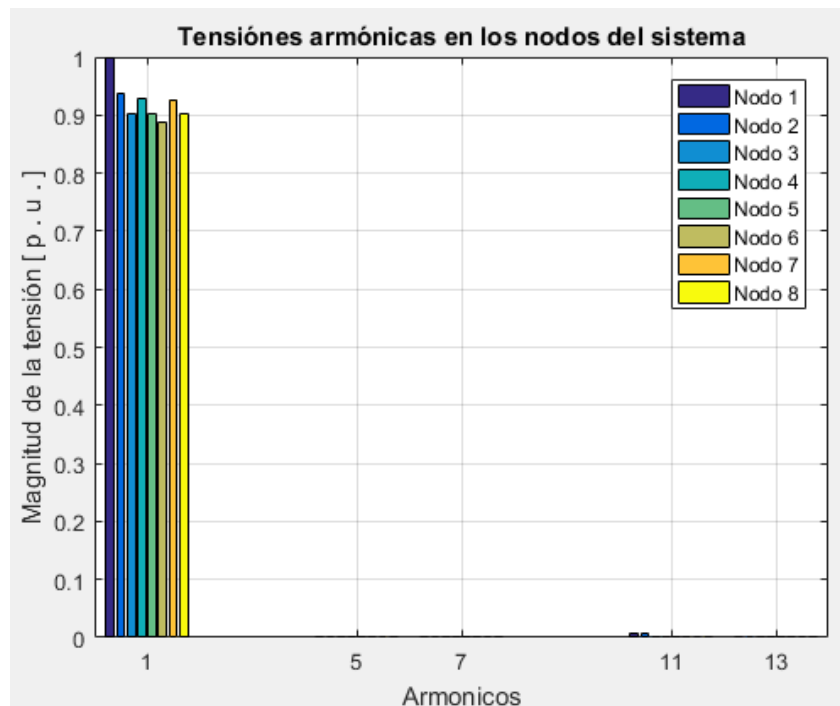


Figura 72. Tensiones armónicas con el filtro

En las siguientes figuras se puede observar cómo se logró mejorar la forma de la onda de cada uno de los nodos.

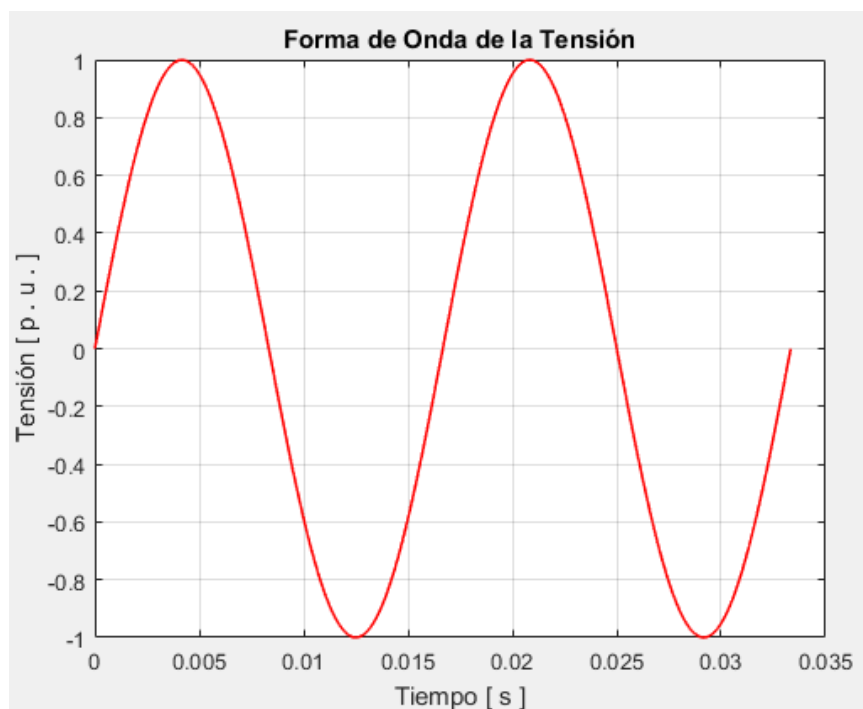


Figura 73. Forma de onda nodo 1 con filtro.

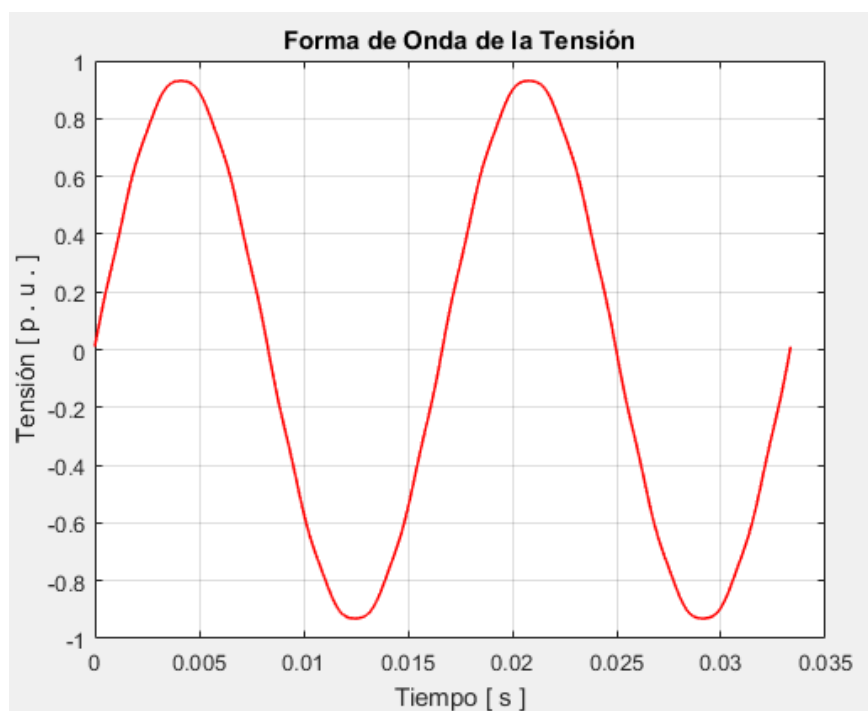


Figura 74. Forma de onda nodo 2 con filtro.

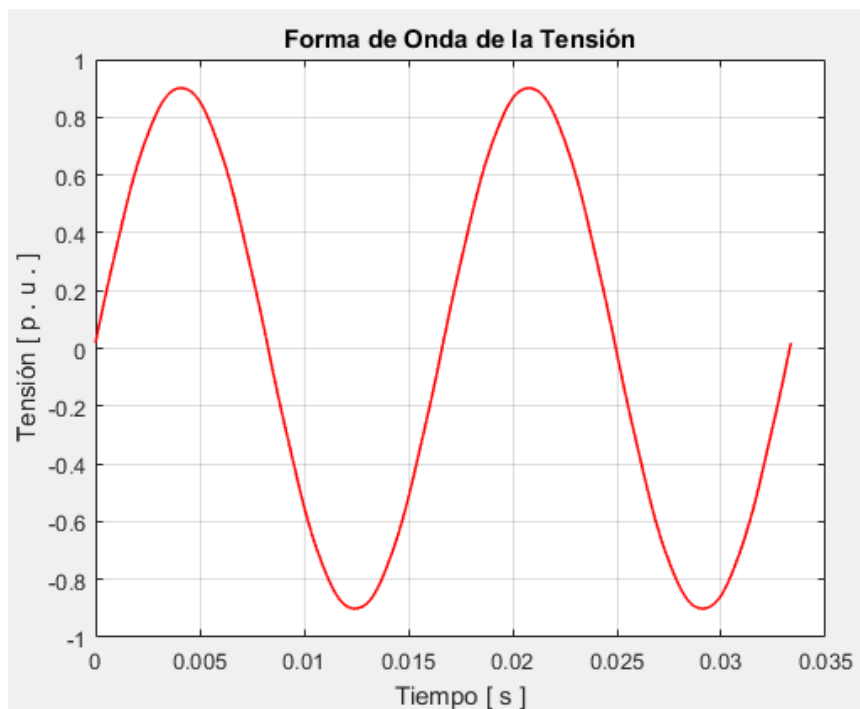


Figura 75. Forma de onda nodo 3 con filtro.

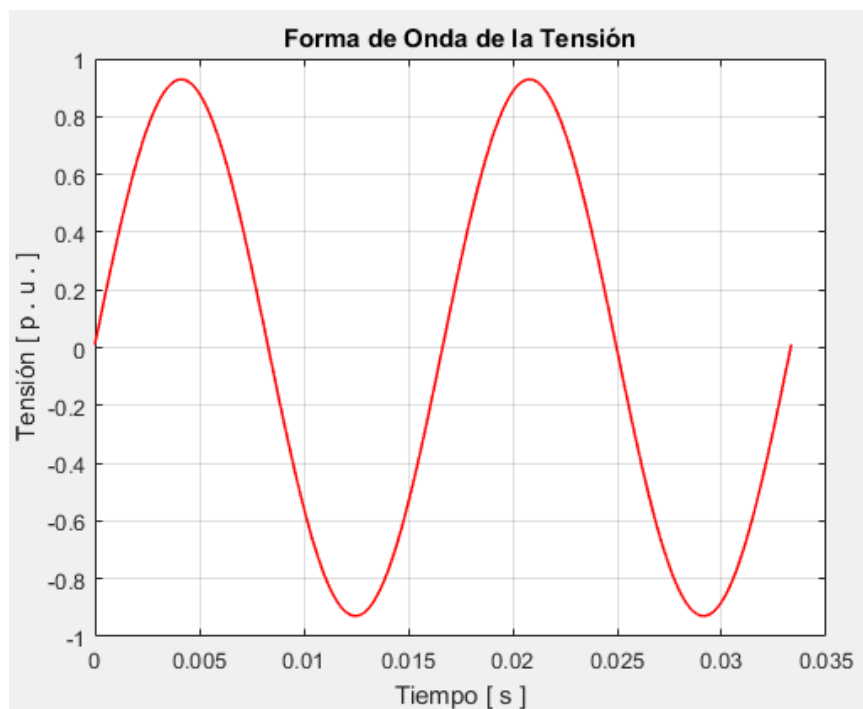


Figura 76. Forma de onda nodo 4 con filtro.

En el nodo 4, figura (76), después de conectar el filtro se ve una reducción en la distorsión de la onda con un THDV de 0,69% y sus magnitudes de corrientes armónicas de 0,0001; 0,0001; 0,0013 y 0,0003 todas en PU para 5°, 7°, 11° y 13° armónicos respectivamente, estando dentro de los estándares permitidos por el estándar [13]. Los demás nodos del sistema se pueden ver en la tabla 21.

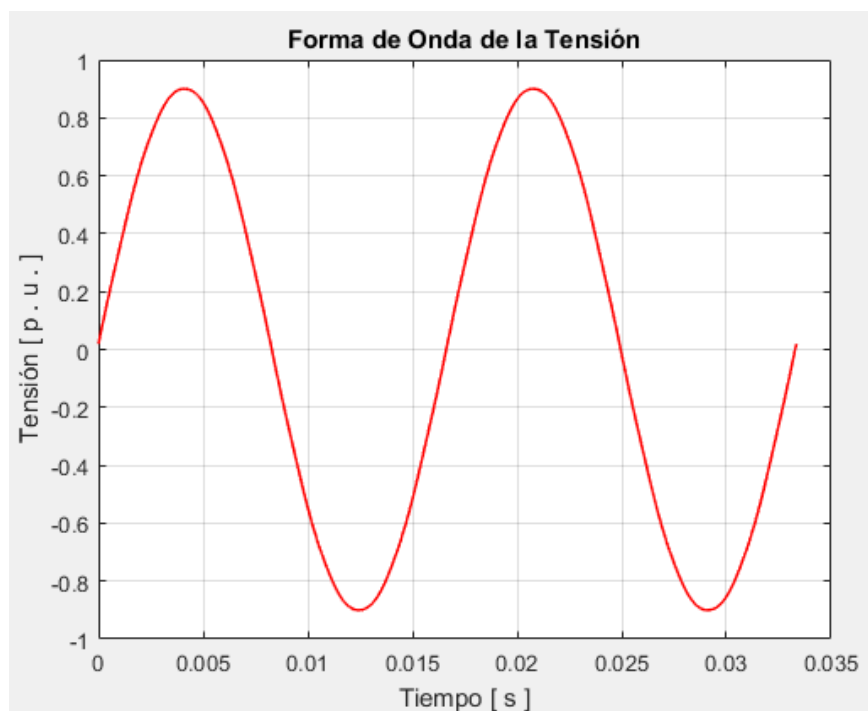


Figura 77. Forma de onda nodo 5 con filtro.

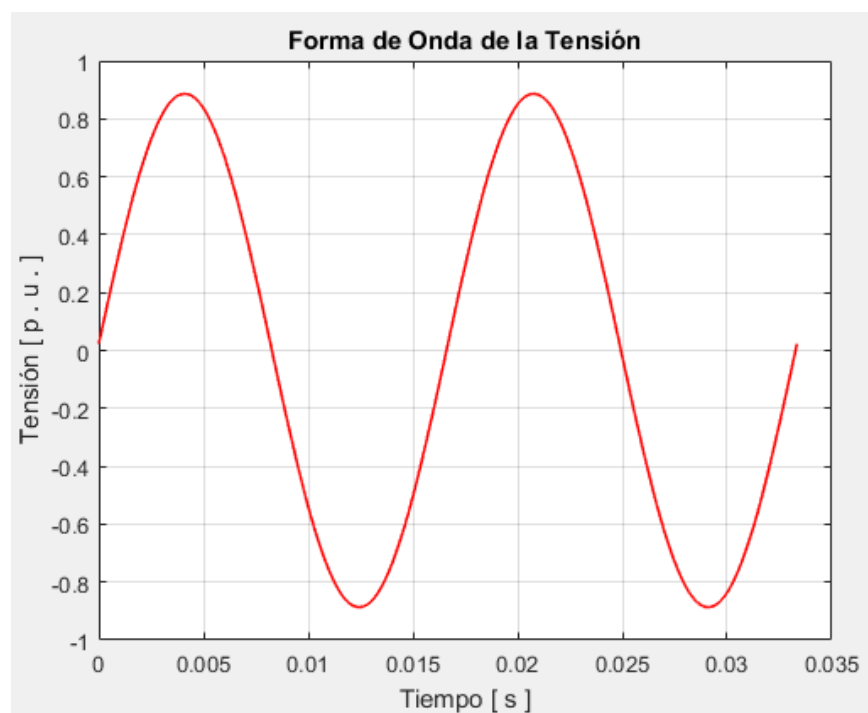


Figura 78. Forma de onda nodo 6 con filtro.

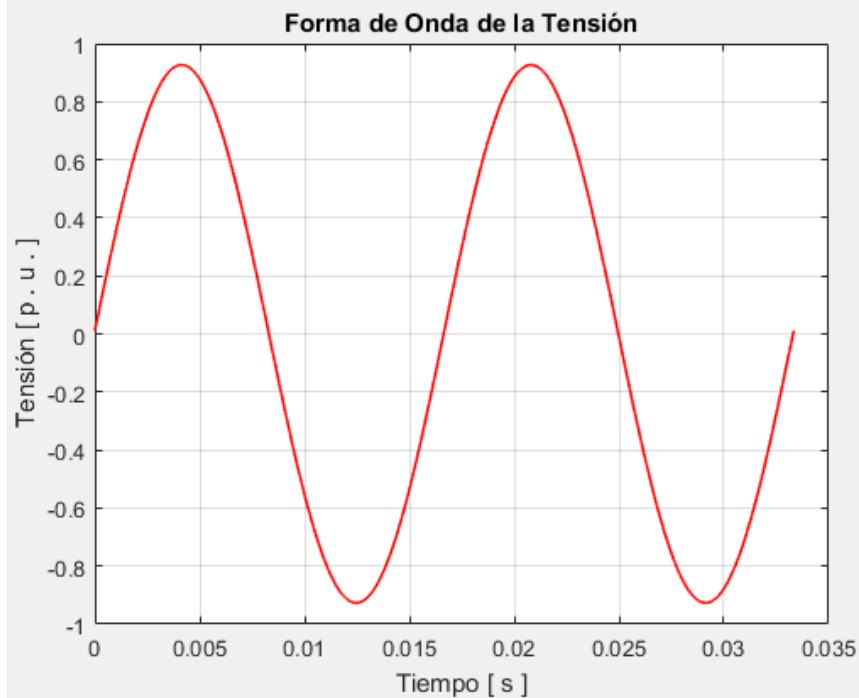


Figura 79. Forma de onda nodo 7 con filtro.

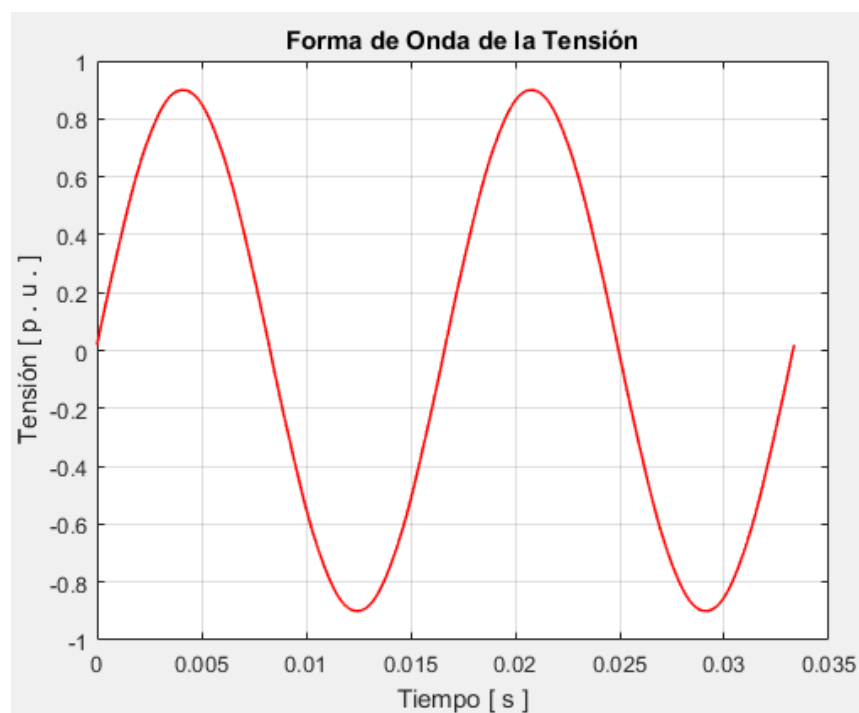


Figura 80. Forma de onda nodo 8 con filtro.

En las figuras (77), (78), (79) y (80) se hace evidente que el filtro logra reducir casi por completo los efectos de estas cargas no lineales en el sistema, las ondas tienen una forma sinusoidal pura, no presenta distorsión como se observa en la tabla 21.

6.4.2- Barrido en frecuencia con la implementación del filtro

Este método se corre con el fin de verificar el estado de resonancia del sistema, que nodos presentan resonancias en paralelo y cuales en serie. Para eso se corre el programa desarrollado en el software Matlab, empezando por la frecuencia fundamental hasta llegar al armónico 50 (3000Hz), pero esta vez ya tiene el filtro conectado, buscando reducir los picos de resonancia y evitar que estén cerca del fundamental.

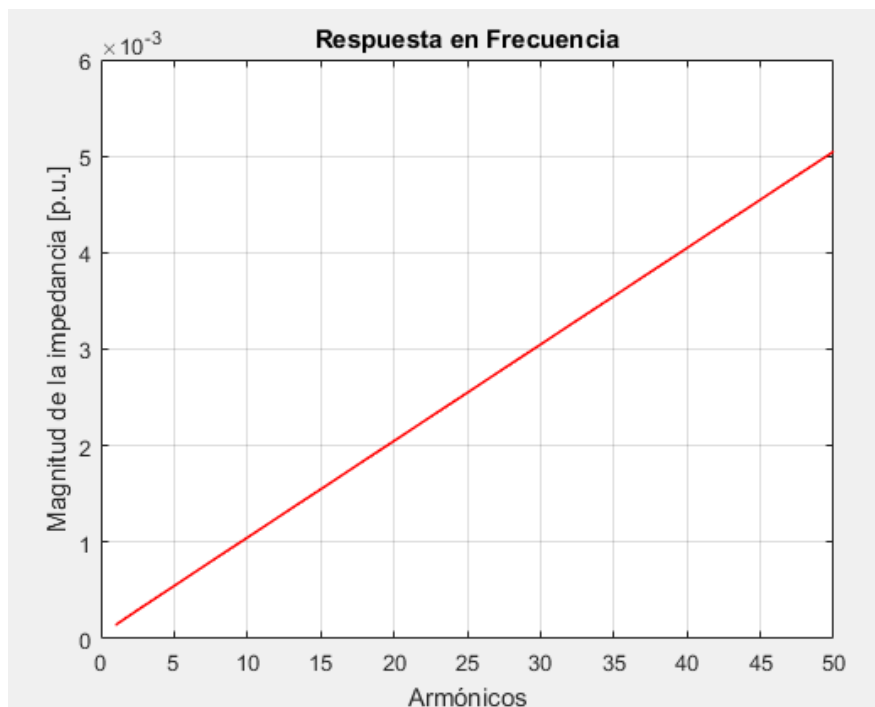


Figura 81. Respuesta en frecuencia nodo 1 con filtro.

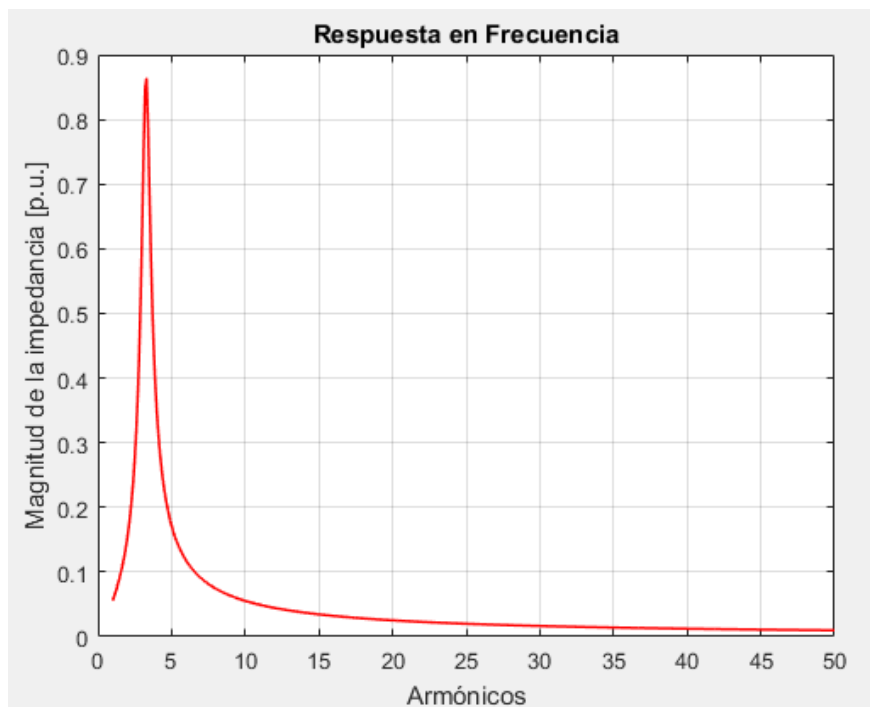


Figura 82. Respuesta en frecuencia nodo 2 con filtro

En la gráfica (82) se observa un pico que es debido a una resonancia paralelo, antes de implementar el filtro estas resonancias no estaban como se observa en la figura (65), esto se debe a que no había elementos derivación conectados al sistema. Aunque este pico que se ven cerca del quinto armónico, lo cual presenta resonancia y aumento en la tensión, realmente no es de gran relevancia para el sistema ya que este es producto de los elementos en derivación y no de las cargas no lineales.

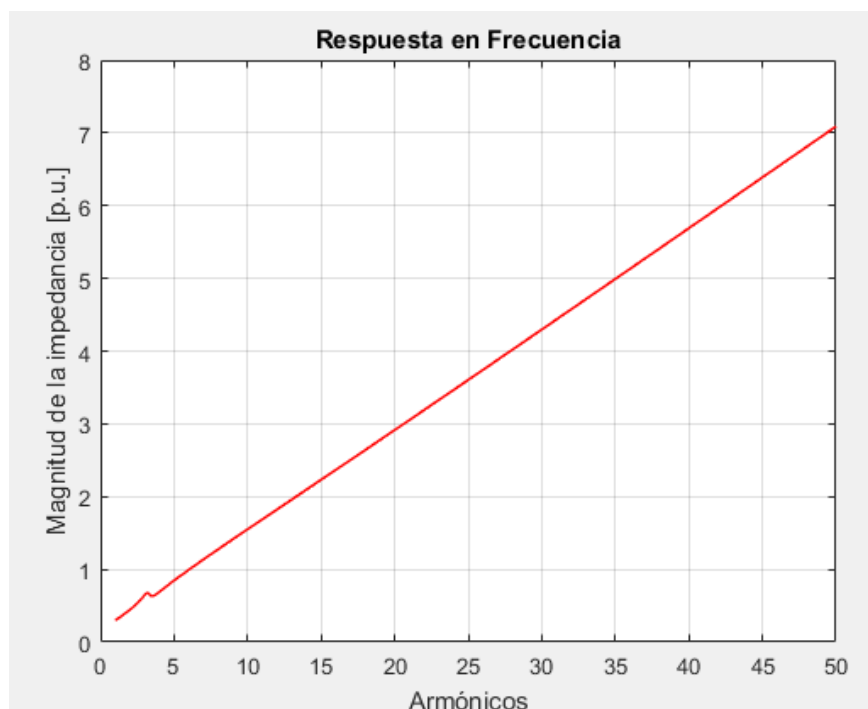


Figura 83. Respuesta en frecuencia nodo 3 con filtro.

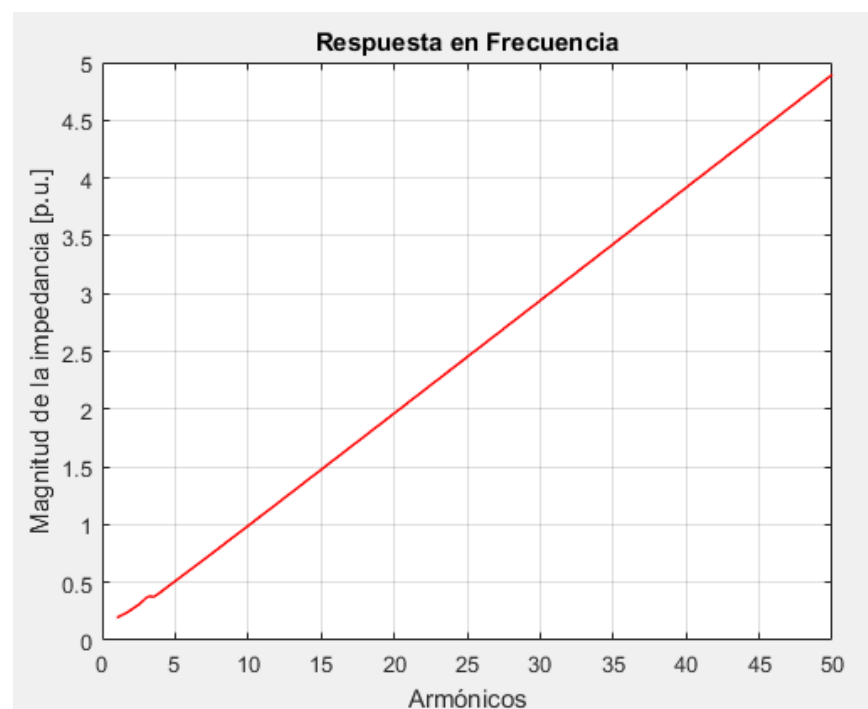


Figura 84. Respuesta en frecuencia nodo 4 con filtro.

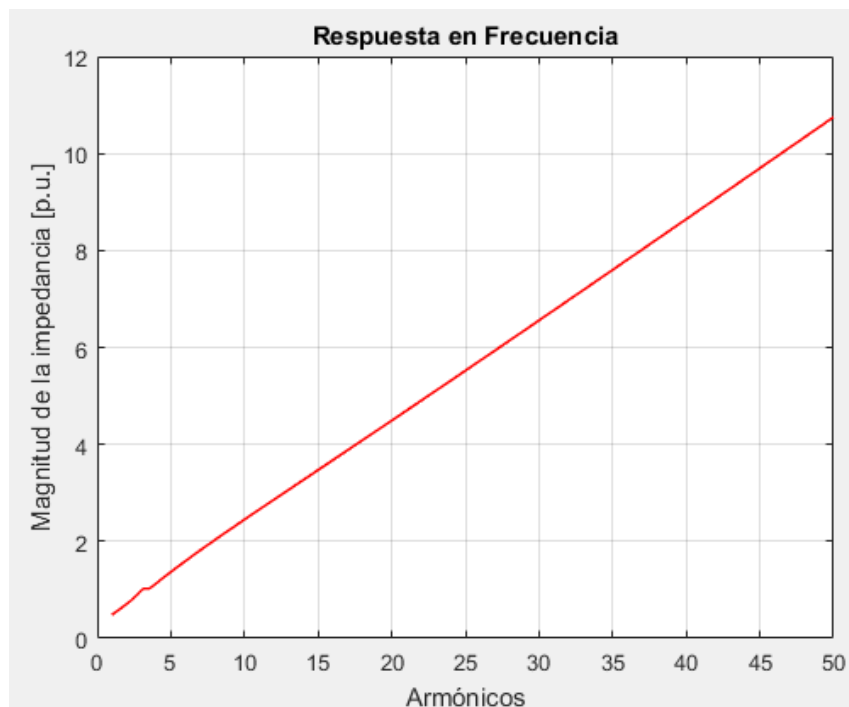


Figura 85. Respuesta en frecuencia nodo 5 con filtro.

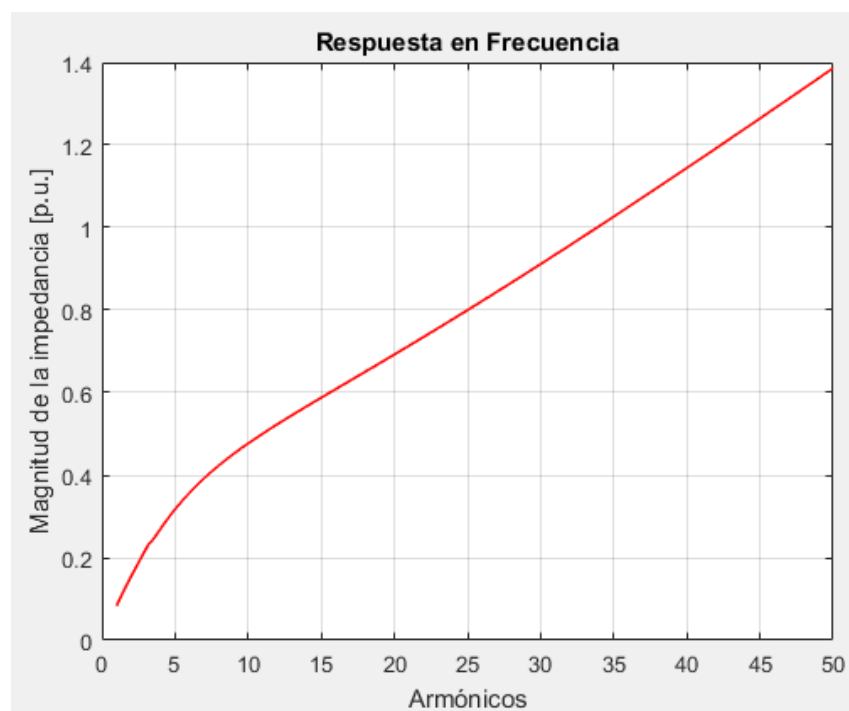


Figura 86. Respuesta en frecuencia no 6 con filtro.

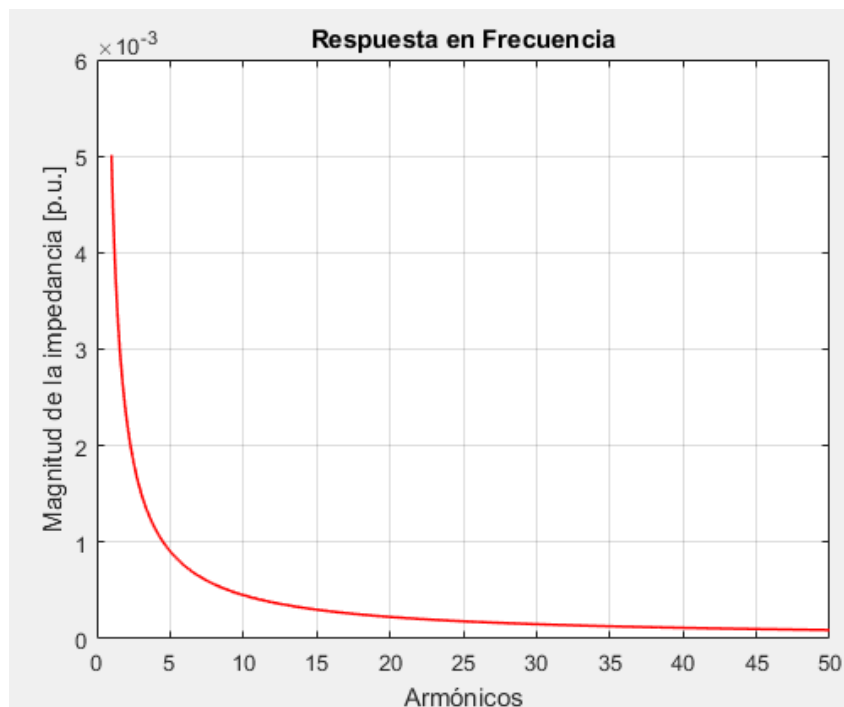


Figura 87. Respuesta en frecuencia nodo 7 con filtro.

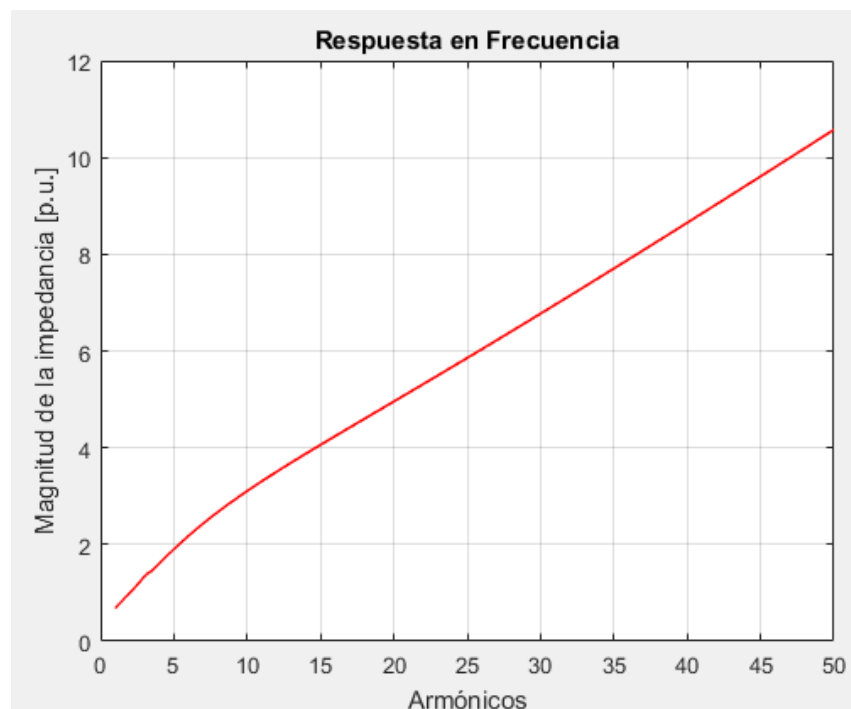


Figura 88. Respuesta en frecuencia nodo 8 con filtro.

Como ya se mencionó anteriormente en la figura (82) y (87) se observan picos en la respuesta en frecuencia, el pico presente en el nodo dos es el de mayor cuidado, ya que este se encuentra más cerca del fundamental, aunque no genera mayores inconvenientes ya que estos se deben a los elementos en derivación y no a las cargas no lineales. En el nodo siete aparece una disminución en la magnitud de la

impedancia conforme aumentan los armónicos, aunque esta magnitud ya es bastante pequeña, se debe tener en cuenta ya que está cerca del fundamental.

En resumen, al momento de implementar el filtro se logra corregir los problemas producidos por las cargas no lineales y en este sistema se logró reducir el problema de la resonancia debido a la implementación de los mismo.

6.4.3- Parámetros para el diseño del filtro

Con los resultados obtenidos por medio de los programas implementados en Matlab, se diseña el filtro que se conectara en los nodos donde aparecen las corrientes armónicas, con el fin de lograr la disminución de las mismas y obtener el sistema un THDV dentro de los estándares de la IEEE 519-1992 [11]. El arreglo del banco de capacitores trifásico se conformará de la siguiente manera:

Para el filtro ubicado en el nodo 2:

Se deben compensar 63 KVAR, para estos se deben disponer de veintidós grupos en serie para cada una de las fases y cada uno de estos grupos compuesto por siete capacitores en paralelo, cada uno con 10 KVAR (70 KVAR). Cada grupo estará expuesto a una tensión de 600V con un total de 13,2 KV fase-neutro por todos los grupos.

Para el filtro ubicado en el nodo 7:

Se deben compensar 33,3 KVAR, para estos se deben disponer veintidós grupos en serie para cada una de las fases y cada uno de los grupos está compuesto por cuatro capacitores en paralelo cada uno con 10 KVAR (40 KVAR). Cada grupo estará expuesto a una tensión de 600V con un total de 13,2 KV fase-neutro por todos los grupos.

En la tabla 21 se puede observar la reducción del THDV, logrando con esto establecer el sistema dentro de los límites permitidos por el estándar, corrigiendo así el problema generado por la distorsión armónica debido a las cargas no lineales presentes este.

7- Conclusiones

Este trabajo se orienta hacia una manera fácil, económica y efectiva de corregir los problemas de corrientes armónicas debido a las cargas no lineales, que cada vez se hacen más necesarias en los sistemas, ya que estas están presentes en los rectificadores trifásico, muy empleados en las industrias, o los equipos electrónicos presentes en todos los hogares e industrias, la implementación de iluminación led, etc. Para esto se implementó una metodología para el diseño de filtros pasivos con el fin de mitigar este impacto y poder reducir la distorsión armónica, reduciendo y llevando a los límites establecidos por el estándar IEEE 519-1992 [11] los niveles de THDV. Se plantearon tres objetivos específicos, el primero se logró verificar al momento de implementar la metodología, se revisaron dos casos, uno para un sistema de prueba de nueve nodos y el otro para un sistema de prueba de ocho nodos, en ambos verifiqué la reducción de los niveles de THDV, llevándolos a lo establecido por el estándar. El segundo se verificó que esta metodología al ser empleada en sistemas de mayor dimensión tiene una respuesta satisfactoria, funcionando tanto en sistemas de menor dimensión como de mayor dimensión. El tercero se verifica en las gráficas implementadas en el trabajo, donde se puede observar como la onda se veía distorsionada antes de implementar los filtros para ambos casos y como se veían estas tensiones armónicas con una magnitud grande para cada uno de los armónicos estudiados (5° , 7° , 11° y 13°) y al momento de emplear la metodología y escoger los parámetros del filtro, se ve una reducción notable y una mejora en las formas de onda, dejándolas casi de manera sinusoidal puras. Se revisó el problema de resonancia que se presenta al momento de conectar los filtros debido a los elementos en derivación que tiene el sistema, para el caso de nueve nodos, estas resonancias se mejoraron cuando se implementó el filtro, ya que estas estaban cerca de la fundamental para algunos nodos u otros tenían picos muy pronunciados, lo que daba como resultado aumento en la tensión para esos nodos y generando así calentamiento de los conductores o destrucción de los elementos en derivación por sobretensiones. Para el sistema de ocho nodos, al no tener elemento en derivación antes de implementar el filtro, estos no presentaban resonancias ni paralelo ni serie, por lo que al momento en el que se conectó el filtro se logró ver un aumento en los picos, pero al ser estos picos productos del filtro y no de la fuente de armónicos, no presentan problemas por sobretensiones y por lo tanto no presentan inconvenientes.

En resumen, se verificó que la metodología funciona correctamente para los sistemas probados, los filtros diseñados tienen una respuesta satisfactoria ante estas condiciones y cumplen con los límites del estándar. La ventaja de implementar filtros pasivos es su economía y efectividad en estos casos, por eso al momento de filtrar armónicos para sistemas de distribución y transmisión se recomienda emplear estos [14].

8- Bibliografía

- [1] J. Arcila, “ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS”. [en línea]. Disponible en: <https://goo.gl/R7YTu7>
- [2] M. Barajas y P. Bañuelos, “Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos”, Ing. Invest. Y tecnol. Vol.11 no.2 México abr/jun. 2010
- [3] R. Gallego, J. Galvis Y A. Garcés, “MODELAMIENTO DE CARGAS NO LINEALES PARA ANÁLISIS ARMÓNICO”, Scientia et Technica Año X. No 26. Diciembre 2004
- [4] G. Reyes, “Armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica”, Tesis de maestría, Universidad autónoma de nuevo león, Monterrey, México, 1996
- [5] A. Quintanilla, “Barrido de frecuencia”, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2013
- [6] J. Arrillaga Y L. Eguíluz, “*Armónicos en sistemas de potencia*”, Universidad de cantabria, 1994
- [7] S. Mark Halpin, F. Ribeiro Y J. Dai “Frequency-Domain harmonics analysis methods”. Mississippi State University, Starkville, MS BWX Technologies Inc, Lynchburg, VA Operations Technology inc, Irvine CA. [en línea], Disponible en: <https://goo.gl/oxGhvP>
- [8] S. Chen Y G. Joos, “Analysis and comparison of passive & active harmonic suppression filters in distribution systems”, 2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings. Navigating to a New Era, Halifax, NS, Canada, 2000
- [9] Vázquez, J & Flores, Jose & Revuelta, Patricio & Litrán, Salvador. (2018). “Diseño de filtros pasivos, activos e híbridos para la compensación armónica de cargas trifásicas no lineales.” [en línea]. Disponible en: <https://goo.gl/ohvkuK>

- [10] R. Gallego, C. Rios Y M. Aristizabal, “Análisis de armónicos en sistemas eléctricos”, *cientia et Technica*. No 21. Julio 2003

- [11] IEEE standard 182002, “IEEE Standard for Shunt Power Capacitors”, IEEE, 2002

- [12] F. C. De La Rosa, “*Harmonics and power systems*”, Publicado en 2006 por Taylor Francis Group

- [13] IEEE standar 1519-1992, “IEEE Recomendend Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System”, IEEE, 1992.

- [14] S. Aguilar, J. Bermúdez, “Método sistemático para el diseño de filtros pasivos en sistemas eléctricos de potencia”, tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2012

